



**Wuppertal Institut**  
für Klima, Umwelt, Energie  
GmbH

Armin Vetter  
Karin Arnold

**Klima- und Umwelteffekte  
von Biomethan:**

**Anlagentechnik und  
Substratauswahl**

**Nr. 182** • Februar 2010  
ISSN 0949-5266

**Wuppertal Papers**

Herausgeber / Publisher:

Wuppertal Institut

für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Döppersberg 19

42103 Wuppertal

Autorin / Autor:

Karin Arnold

Forschungsgruppe 1: Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen

Email: [karin.arnold@wupperinst.org](mailto:karin.arnold@wupperinst.org)

Armin Vetter

TLL Dornburg

Email: [armin.vetter@tll.thueringen.de](mailto:armin.vetter@tll.thueringen.de)

„Wuppertal Papers“ sind Diskussionspapiere. Sie sollen Interessenten frühzeitig mit bestimmten Aspekten der Arbeit des Instituts vertraut machen und zu kritischer Diskussion einladen. Das Wuppertal Institut achtet auf ihre wissenschaftliche Qualität, identifiziert sich aber nicht notwendigerweise mit ihrem Inhalt.

“Wuppertal Papers” are discussion papers. Their purpose is to introduce, at an early stage, certain aspects of the Wuppertal Institute’s work to interested parties and to initiate critical discussions. The Wuppertal Institute considers its scientific quality as important, however, it does not essentially identify itself with the content.

## Zusammenfassung

Das vorliegende Diskussionspapier leistet einen Beitrag zur Bewertung der Option „Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz“, indem die Treibhausgasbilanz der Prozesskette sowie die Umwelteffekte durch den Anbau der Substrate detailliert untersucht werden. Die Ergebnisse werden durch laufende weitere Arbeiten der Autoren in den größeren Kontext der umfassenden Untersuchung und Bewertung der Rolle von Biomethan im zukünftigen Energiesystem eingeordnet. Die Kenntnis der Klima- und Umwelteffekte bilden einen wichtigen Baustein in der ganzheitlichen Bewertung. Biogas kann aus Fermentation verschiedener feuchter Biomasse erzeugt werden. Nach der Aufbereitung (im Wesentlichen bestehend aus Entschwefelung, Trocknung und CO<sub>2</sub>-Abtrennung) spricht man von Biomethan, das als vollständiges Erdgas-Substitut ins Erdgasnetz eingespeist werden kann, um für alle Erdgasanwendungen zur Verfügung zu stehen.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten sind für fünf Standorte in Deutschland **regional angepasste Fruchtfolgen** untersucht worden, in denen neben gängigen Ackerfrüchten auch Biogassubstrate angebaut werden können. Die betrachteten Substrate umfassen neben Mais auch Futterroggen und Futterhirse, Ganzpflanzensilage aus Wintergerste und Wintertriticale, ein Gemisch aus Mais und Sonnenblumen sowie das Ackergras Landsberger Gemenge. An den Standorten wurden die Auswirkungen auf die Humusbilanz, die Bodenbedeckung (Erosionsschutz) sowie die Biodiversität betrachtet. Im Ergebnis sind durch die Erzeugung von Biogassubstraten nach guter landwirtschaftlicher Praxis keine negativen Umweltwirkungen zu erwarten.

Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Biomethanbereitstellung wird zwischen **zwei Anlagentypen** unterschieden: (1) einer großmaßstäblich geführten Anlage nach heutigem „**Stand der Technik**“, die eine durchschnittlich effektive Biogasanlage im Jahr 2008 im industriellen Maßstab abbildet und (2) einer Anlage, die als „**Optimierte Technik**“ das aus heutiger Sicht und für die nahe Zukunft denkbare Optimierungspotenzial so weit wie möglich ausschöpft. Im Vergleich zum erstgenannten Anlagentyp können die THG-Emissionen durch die optimierte Technik um rund 30 % von 97 g CO<sub>2</sub>äq/kWh auf 67 g CO<sub>2</sub>äq/kWh reduziert werden. Kleinere und ältere Biogasanlagen sind im Rahmen dieser Arbeiten nicht näher untersucht worden; ihre Emissionsfaktoren können durchaus von den hier vorgestellten Ergebnissen abweichen.

Im **mittelfristigen Ausblick bis 2030** kann aus der Betrachtung des bereits erzielten Fortschritts von der Anlagenkonfiguration nach dem heutigen Stand der Technik zur optimierten Technik eine THG-Bilanz der großmaßstäblichen und industriellen Biomethanherzeugung von rund 53 g CO<sub>2</sub>äq/kWh abgeschätzt werden. Das Optimierungspotenzial liegt dabei hauptsächlich noch im übergreifenden Prozessmanagement.

## Abstract

The discussion paper presented contributes to an assessment of the option “bio-methane for injection into the natural gas grid” by taking a close look to the greenhouse gas (GHG) balance of the process chain as well as at the environmental aspects of cultivation biogas substrates. The results will be associated in ongoing research of the authors with a broader context of further assessment of the possible role of bio-methane in a sustainable energy system. The knowledge of climate and environmental effects therefore plays an important role.

Biogas is produced through fermentation of various wet biomass. After upgrading to the quality of natural gas (mostly by desulphurisation, drying and CO<sub>2</sub> sequestration) the subsequent so-called bio-methane can be used as a perfect substitute for natural gas.

In the presented paper, for five different locations throughout Germany **regionally adjusted crop rotation systems** for the provision of biogas substrates were composed, containing not only energy crops, but as well different “conventional” crops, as they are typical and well known in the specific regions. The substrates evaluated in this paper – aside from maize – are rye, sorghum, whole-crop-silage from triticale and barley, and the innovative options of agricultural grass (*Landsberger Gemenge*) and a combination of maize and sunflower. At the five locations, the effects to the balance of humus, the coverage of soil (protection against erosion) and biodiversity were looked at. As a result, while applying good agricultural praxis, no negative effects to the environment through cultivation of biogas substrates are anticipated.

For the calculation of GHG emissions, **two different types of biogas plants** have been in the focus of the study: (1) the **current state-of-the-art** as an industrialised, but average efficient biogas plant in the year 2008 and (2) a new, large-scale plant with **optimized technology**, representing already the next generation of biogas plants by widely exploiting the optimisation potential of the near future. Compared to the state-of-the-art plant, GHG emissions can be decreased by about 30%, from 97 g CO<sub>2</sub>eq/kWh to 67 g CO<sub>2</sub>eq/kWh, if optimized technology is applied. Small-scale agricultural and older biogas plant have not been in the focus of the presented work; their emission factor can by all means vary significantly from the here given results.

For the **mid-term to 2030**, the GHG balance can be deduced from the considerations of the already achieved progress from the current state-of-the-art to an optimized technology to account for about 53 g CO<sub>2</sub>eq/kWh for an large-scale industrialised plant. The optimisation potential originates mostly from an integrated, comprehensive process management.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Deckblatt</b>	<b>1</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1 <i>Einordnung in den Kontext</i>	7
1.2 <i>Angewandte Methodik</i>	12
<b>2 Substratbereitstellung: Optionen der deutschen Landwirtschaft</b>	<b>14</b>
2.1 <i>Substratbereitstellung in Fruchtfolgen: gute fachliche Praxis</i>	15
2.2 <i>Umwelteffekte der Substratbereitstellung</i>	15
2.2.1 Maschineneinsatz und Düngung	16
2.2.2 Auswirkungen des Substratanbaus auf die Humusbilanz	17
2.2.3 Auswirkungen auf Erosionsschutz durch Bodenbedeckung	17
2.2.4 Auswirkungen auf die Biodiversität	18
<b>3 Technische Prozesskette „Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz“</b>	<b>20</b>
3.1 <i>Beschreibung der Prozesskette</i>	20
3.2 <i>Bilanz der Treibhausgas-Emissionen – Fokus Anlagentechnik</i>	23
3.2.1 Ableitung der Emissionsfaktoren für die Biomethan-Prozesskette	23
3.2.2 Emissionsfaktoren der Biomethanprozesskette	27
3.2.3 Anlagentechnik: Sensitivitäts-Analyse einzelner Parameter	29
3.3 <i>Zwischenfazit</i>	30
<b>4 Klima- und Umwelteffekte durch Substrate aus regional angepassten Anbausystemen</b>	<b>32</b>
4.1 <i>Ausgewählte Modellstandorte und Anbausysteme</i>	32
4.1.1 Kriterien zur Auswahl der betrachteten Regionen	32
4.1.2 Ausgewählte Regionen	34
4.1.3 Regionale Anbausysteme der Modellstandorte zur Produktion von Biogassubstrat	36
4.2 <i>Umwelteffekte durch regional angepasste Fruchtfolgen an Modellstandorten</i>	40
4.2.1 Maschineneinsatz und Düngung	40
4.2.2 Auswirkungen des Substratanbaus auf die Humusbilanz	41
4.2.3 Auswirkungen der Substraterzeugung auf den Erosionsschutz durch Bodenbedeckung	43
4.2.4 Auswirkungen des Substratanbaus auf die Biodiversität	44
4.3 <i>Klimaeffekte durch regional angepasste Fruchtfolgen an Modellstandorten (THG-Bilanz)</i>	44
4.3.1 THG-Bilanz der Anbausysteme	45
4.3.2 THG-Bilanz der Modellstandorte	48
<b>5 Sensitivitätsanalyse</b>	<b>50</b>
5.1 <i>Auswirkungen des Anbaus von Mais in Monokultur</i>	50
5.2 <i>Einfluss der Länge des Substrattransports auf die THG-Bilanz</i>	52
5.3 <i>Einfluss der Lachgas-Emissionen auf die THG-Bilanz</i>	54
5.4 <i>Einfluss der Aufwendungen zur Bereitstellung von Stickstoff-Dünger auf die THG-Bilanz</i>	56
<b>6 Ausblick: Optimierungspotenzial der Biomethanproduktion</b>	<b>58</b>
6.1 <i>Faktor Substratbereitstellung</i>	58

6.1.1	Effekte durch den Klimawandel	58
6.1.2	Effekte durch Ackerbau und Züchtungen	59
6.1.3	Zukünftige verfügbare Anbausysteme	60
6.2	<i>Faktor Anlagenbau</i>	64
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>70</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AZ	Ackerzahl
BHKW	Block-Heizkraftwerk
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DMK	Deutsches Mais Komitee
DWW	Druck-Wasser-Wäsche
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FM	Feuchtmasse
FNR	Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe
GPS	Ganzpflanzensilage
GVE	Großvieh-Einheit
ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Kalium
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
MJ	Mega-Joule
N	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Lachgas
Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe
Nm <sup>3</sup>	Norm-Kubikmeter
P	Phosphat
PSA	Pressure Swing Adsorption
t	Tonnen
THG	Treibhausgas
TS	Trockensubstanz

# 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, aber auch im Zuge der Verknappung fossiler Ressourcen und des -aus Gründen der Versorgungssicherheit- kritisch diskutierten Erdgasbezugs aus anderen Ländern gewinnt die Diskussion um die Bereitstellung von Biogas und Biomethan aus heimischen Ressourcen an Bedeutung.

Seit rund drei Jahren gibt es in Deutschland erste Projekte, durch anaerobe Fermentation erzeugtes Biogas auf Basis unterschiedlicher feuchter Biomasse bis auf Erdgasqualität aufzubereiten und ins vorhandene Erdgasnetz einzuspeisen. Auf diese Weise ist das nun vorliegende Biomethan als vollständiges Substitut von Erdgas für verschiedenste Anwendungen nutzbar. Mit diesem Schritt der Aufbereitung, Einspeisung und Verteilung über die bestehende Infrastruktur des Erdgasnetzes ist in der deutschen Biogasbranche ein Sprung erfolgt: der Energieträger steht nun nicht mehr nur im kleinmaßstäblichen, lokal begrenzten Umfeld zur Verfügung, sondern die Biomethantechnologie bereitet sich vor, neue Märkte zu erobern. Die skizzierte Entwicklung geht mit einer Professionalisierung, aber auch mit einer Industrialisierung einher, die fragen lässt, welche Rolle Biomethan zukünftig als regionale, landwirtschaftliche und klimaverträgliche Ressource spielen kann.

## 1.1 Einordnung in den Kontext

Zur umfassenden Bewertung und Optimierung der Rolle von Biomethan als Baustein im zukünftigen Energiesystem muss geprüft werden, welche Mengen an Ackerfläche und daraus resultierend an Substrat in Deutschland zur Verfügung stehen können, ohne in Konkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zu treten. Darüber hinaus ist zu klären, durch welche Anwendung in welchem der Bereiche der Strom-, Wärme- oder Kraftstoffbereitstellung der höchste Beitrag zum Klimaschutz durch Vermeidung von Treibhausgasen geleistet werden kann. Bevor diese Fragen angegangen werden können, ist aber zunächst die spezifische ökologische Wirkung, die mit der Erzeugung des Biomethans verbunden ist, zu ermitteln.

Dieser Aspekt steht im Fokus des vorliegenden Diskussionspapiers, das damit einen Beitrag zu der Abschätzung leistet, in wie weit Biomethan auf Basis verschiedener pflanzlicher Rohstoffe geeignet ist, durch Verminderung von Treibhausgas (THG)-Emissionen das Klima zu schützen und wie sich die gleichzeitig auftretenden Effekte auf die Umwelt durch den Anbau der Substrate darstellen. Diese Themen bewegen sowohl die Biogasbranche in Deutschland, als auch die

Akteure aus Forschung und Wissenschaft. Im ersten Abschnitt erfolgt daher die Einordnung in die bestehende Diskurse auf beiden Ebenen.

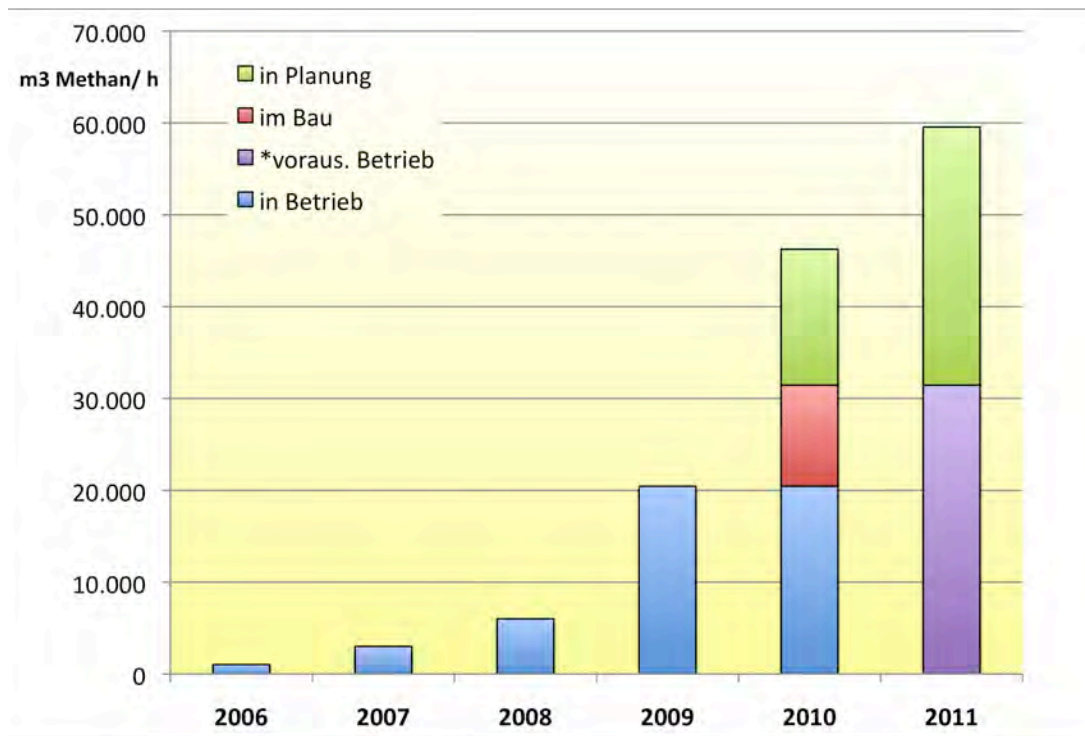
Die Bereitstellung von Biomethan auf Basis von landwirtschaftlichen, kommunalen und industriellen Reststoffen wird dagegen nicht betrachtet. Die Fermentation sowie Aufbereitung erfolgt zwar mit ganz ähnlicher Technik; die Vorkette der Bereitstellung der Substrate unterscheidet sich jedoch erheblich von dem hier untersuchten gezielten Anbau von Energiepflanzen.

Im vorliegenden Diskussionspapier werden zudem nur solche Biogasanlagen betrachtet, an denen alle Prozessabschnitte von der Fermentation bis zur Aufbereitung großmaßstäblich betrieben werden und die sich mindestens auf dem Stand der Technik 2008 befinden. Damit sind die hier vorgestellten Ergebnisse nicht in jedem Fall auf kleinere und ältere Biogasanlagen übertragbar.

### **Entwicklung der Biomethanbranche in Deutschland**

Seitdem gegen Ende des Jahres 2006 die ersten beiden Anlagen zur Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz nahezu zeitgleich in Betrieb genommen wurden, hat insbesondere dieser spezielle Zweig der Bioenergie-Branche einen starken Aufschwung erlebt (Abbildung 1-1). In Pliening (Bayern) und Straelen (NRW) ist nicht nur die grundsätzliche Machbarkeit der Prozesskette „Biogaserzeugung – Aufbereitung – Einspeisung ins Erdgasnetz“ bewiesen worden, sondern gleichzeitig auch die Attraktivität der Entkopplung vom Ort der Energieerzeugung und Ort der Nutzung.





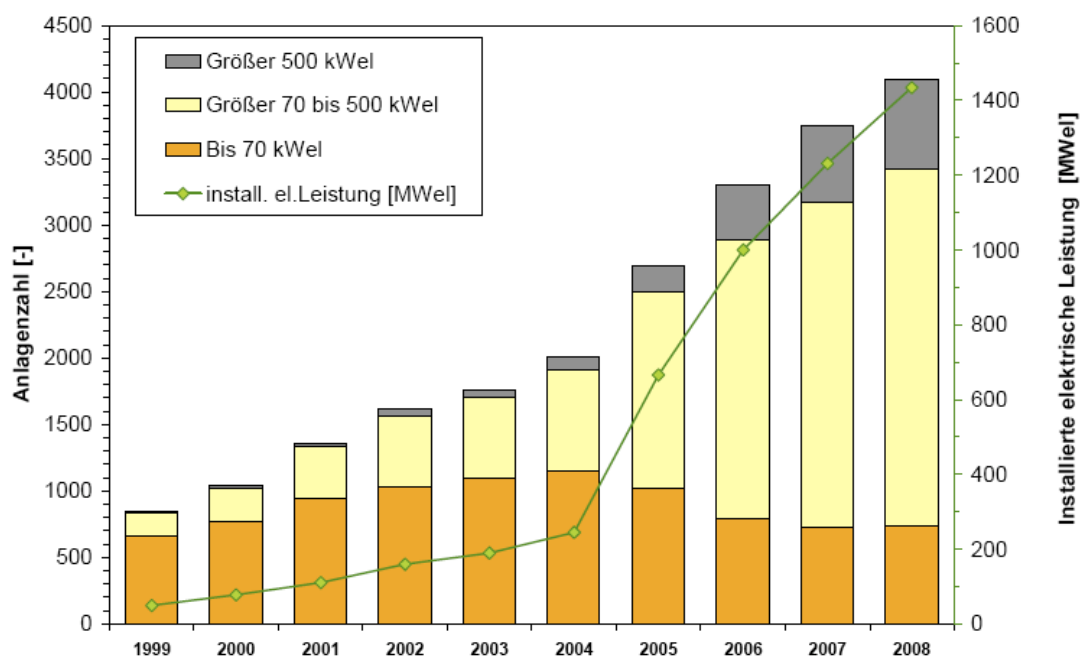
**Abbildung 1-1: Biomethan zur Einspeisung in Deutschland, kumuliert [verändert nach dem Einspeiseatlas<sup>1</sup>]**

Standen bisher direkt an der Biogasanlage Blockheizkraftwerke bereit, um das produzierte Gas vor Ort zu verstromen, so kann nach der Einspeisung ins Erdgasnetz das Gas über die bestehende Verteilinfrastruktur über nahezu beliebige Distanzen zum Endverbraucher transportiert werden. Diese Möglichkeit eröffnet also neue Perspektiven in Hinblick auf mögliche Anwendungen für den biogenen Energieträger, wie z.B. die Belieferung räumlich entkoppelter Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Anlagen oder der Einsatz im Verkehrssektor. Der Vorteil besteht in energie- und klimapolitischer Sicht darin, dass der Ort der Verstromung derart gewählt werden kann, dass die anfallende Abwärme ebenfalls einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden kann. Dies ist bei der Nutzung im Blockheizkraftwerk (BHKW) vor Ort, also an einem landwirtschaftlichen Betrieb in vielen Fällen nicht gegeben. Allerdings ist auch hier bereits ein Wandel in der Branche auszumachen: noch in 2006 wurde für über 70 % der geförderten Biogasanlagen nur die Grundvergütung (plus Boni) für die Verstromung, nicht aber die zusätzliche KWK-Vergütung geltend gemacht. Die Nutzung der entstehenden Abwärme musste also in der überwiegenden Zahl der Fälle als nicht gegeben angesehen werden [IEL, 2007]. Dagegen wurde zwei Jahre später, in 2008, bereits für 57 % der Anlagen der KWK-Bonus gezahlt, gegenüber 43 %, die diese Vergütung nicht in Anspruch nehmen konnten [DBFZ, 2009 a].

<sup>1</sup> <http://www.biogaspartner.de/index.php?id=10074>, Zugriff am 28. 01. 2010

In den Fällen, in denen es nicht zu einer Nutzung der entstehenden Abwärme kommt, ist es daher aus energetischen Gründen durchaus zu befürworten, das erzeugte Biogas mittels Aufbereitung und Einspeisung als Biomethan effizienter nutzbar zu machen. Als Erdgassubstitut kann Biomethan neben der Verstromung natürlich auch anderen Sektoren, wie der Wärmebereitstellung, dem Kraftstoffmarkt oder als Industrierohstoff zur Verfügung stehen.

Die Aufbereitung des erzeugten Biogases muss so erfolgen, dass die Beschaffenheit des im Erdgasnetz befindlichen Gases erreicht wird. Auf die technischen (Qualitäts-)Anforderungen wird in Kapitel 3 noch näher eingegangen; es sei aber vorausgeschickt, dass eine Aufbereitung sich erst ab einer bestimmten Größenordnung der Biogasanlage wirtschaftlich betreiben lässt [UMSICHT, 2008]. Vor dem Hintergrund der recht neuen Option, das erzeugte Gas über das Erdgasnetz zu vertreiben, ist die Größe der Biogasanlagen in Deutschland seit dem Jahr 2004 (Erteilung des Bonus für Nachwachsende Rohstoffe (Nawaro) im Erneuerbare-Energien-Gesetz) sichtbar angestiegen [DBFZ, 2009 a].



**Abbildung 1-2: Entwicklung des Biogasanlagenbestands [DBFZ, 2009 a]**

Gleichfalls ist zu bemerken, dass sich in den letzten zwei Jahren verstärkt auch größere Akteure wie z.B. Gasversorgungsunternehmen, im Sektor Biogas engagieren, wo vor dieser Zeit hauptsächlich Landwirte aktiv waren. Es findet eine Industrialisierung der Biogaserzeugung statt, mit der auch eine Professionalisierung im Betrieb der Anlagen einhergeht. Beides schlägt sich in der Effektivität und damit auch in der Treibhausgasbilanz der Prozessketten nieder. Diese Ent-

wicklung ist von einigen Akteuren bereits frühzeitig vorausgesehen worden<sup>2</sup> [EnviTec, 2007] und wird durch das zunehmende Engagement von Gasversorgungsunternehmen bestätigt.

### **Stand von Wissenschaft und Forschung**

Eine Vielzahl von Studien ist zum Thema der Öko-Bilanzierung oder ökologischen Bewertung von Biogas und Biomethan veröffentlicht worden [z.B. IEL, 2006; EMPA, 2007; IEL, 2007 a, 2007 b, 2007 c; Ifeu, 2007, Ifeu, 2008, DBFZ, 2009]. Die Fülle an Daten ist jedoch nicht immer von Vorteil: in der Diskussion werden Ergebnisse verschiedenster Bilanzen und Gutachten verwendet. Dabei ergeben sich Schwierigkeiten daraus, dass unterschiedliche Herangehensweisen, Methodiken und Datengrundlagen verwendet werden, die teilweise nicht nachzuvollziehen und untereinander nicht vergleichbar sind [Grunert, 2008]. Die zugrunde liegenden Annahmen sind nicht in jedem Fall transparent und die Ergebnisse beziehen sich oft auf unterschiedliche funktionelle Einheiten (wie etwa eine Kilowattstunde oder ein Normkubikmeter (Nm<sup>3</sup>) Methan, eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente oder gefahrene Personenkilometer), unterschiedliche Eingangsgrößen oder Systemgrenzen. Ein Vergleich der Daten ist daher nur zum Teil möglich eine Umrechnung aufgrund fehlender Informationen oftmals schwierig.

Zudem ist in vielen Fällen bisher mit Daten für die Substraterzeugung gearbeitet worden, die auf durchschnittlichen Angaben für die Bereitstellung einer einzelnen Pflanze (oftmals Mais) beruhen. Dies bildet nicht unbedingt die Situation an real existierenden Standorten ab und lässt außerdem die vielfältigen anderen Optionen der Substratbereitstellung außer Acht.

### **Untersuchungszusammenhang**

Das vorliegende Diskussionspapier entstammt einer Kooperation der Forschungsgruppe „Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen“ des Wuppertal Instituts mit der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Die hier vorgestellten Arbeiten sind Teil des Projekts „Wissenschaftliche Begleitforschung zur Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz“, das am Wuppertal Institut im Auftrag der E.ON Ruhrgas AG durchgeführt wird. Im Unterauftrag ist die Studie „Eignung und Verfügbarkeit verschiedener Anbausysteme für die Produktion von Biogas-substraten auf Modellstandorten in Deutschland“ an die TLL vergeben worden.

Im Rahmen des übergeordneten Projekts wird eine umfassende Untersuchung und Bewertung der Rolle von Biomethan im zukünftigen Energiesystem vorgenommen. Weitere Arbeitspakete beschäftigen sich mit den zu erwartenden technischen

---

<sup>2</sup> auch: [http://www.finanzen.net/euro/archiv/berichte\\_detail.asp?pkBerichtNr=153932&stmode](http://www.finanzen.net/euro/archiv/berichte_detail.asp?pkBerichtNr=153932&stmode), Zugriff am 17.2. 2008

und wirtschaftlichen Potenzialen, den politischen Rahmenbedingungen, der Konkurrenz zu anderen Bioenergie-Pfaden und der Einordnung des Energieträgers in den Kontext des sich dynamisch entwickelnden Energiesystems in Deutschland. Die Kenntnis der Klima- und Umwelteffekte bilden einen wichtigen Baustein in der ganzheitlichen Bewertung. Aus diesem Grund ist die Entwicklung einer eigenen Öko-Bilanz für Biomethan von Bedeutung. Die Ergebnisse wurden im Januar 2009 in einem Expertenworkshop mit Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Ifeu Instituts, des deutschen Biomasseforschungszentrums, der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft und der E.ON Ruhrgas AG diskutiert und bestätigt.

## 1.2 Angewandte Methodik

In den gemeinsamen Arbeiten des Wuppertal Instituts und der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft sind unterschiedliche Anbausysteme für Biogassubstrate anhand von exemplarischen Modellstandorten in Deutschland betrachtet worden. Es wurde untersucht, wie hier Biogassubstrate effizient produziert und gleichzeitig den Anforderungen einer nachhaltigen und vielfältigen Landwirtschaft Genüge getan werden kann. Die Aufwendungen aus der Substratbereitstellung sind ebenso in eine Ökobilanz eingegangen wie Aspekte des Anlagenbaus der Biomethanproduktion. Auf dieser Grundlage wurden die Klimaeffekte der gesamten Prozesskette evaluiert.

Die Modellierung der Prozesskette sowie die Ökobilanz erfolgt mit der Software UMBERTO®. Die Humusbilanzierung wurde nach der VDLUFA-Methode (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) und den Werten nach *Cross Compliance* durchgeführt [Körschens, 2004]; die Bewertung der übrigen Umwelteffekte entsprechen der gängigen landwirtschaftlichen Praxis.

Folgende Leitfragen sind in den jeweiligen Teilabschnitten bearbeitet worden:

- **Kapitel 2<sup>3</sup>**: Welche Optionen hat die deutsche Landwirtschaft, Biogassubstrate nach guter fachlicher Praxis bereitzustellen? Welche Umwelteffekte werden durch diese verursacht?
- **Kapitel 3<sup>4</sup>**: Wie lässt sich die technische Prozesskette Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz darstellen? Welches sind die relevanten Abschnitte und welche Bedeutung kommt der Substratbereitstellung zu?
- **Kapitel 4<sup>4</sup>**: Wie kann die Erzeugung von Biogassubstraten an verschiedenen Modellstandorten in Deutschland aussehen? Wie sind die Umwelteffekte der Anbausysteme zu bewerten<sup>3</sup> und wie ist die resultierende Treibhausgasbilanz<sup>4</sup>?

---

<sup>3</sup> Die Bearbeitung erfolgt durch die TLL (Armin Vetter).

<sup>4</sup> Die Bearbeitung erfolgt durch das Wuppertal Institut (Karin Arnold).

- **Kapitel 5**<sup>4</sup>: Welcher Einfluss auf die gesamte Prozesskette kommt unterschiedlichen Parametern zu (Sensitivitätsanalyse)?
- **Kapitel 6**: Welche Optimierungspotenziale können im Ackerbau und durch Züchtung<sup>3</sup> sowie durch Anlagentechnik<sup>4</sup> zukünftig noch erschlossen werden?

Mit dem Diskussionspapier wird ein Überblick über die Bandbreite der THG-Emissionen bei der Biomethanerzeugung in verschiedenen Regionen Deutschlands gegeben, welche die Situation an real existierenden Standorten wider spiegeln.

Im Fokus der Arbeiten stehen dabei großmaßstäbliche Biogasanlagen, an denen das Produktgas aufbereitet und als Biomethan ins Erdgasnetz eingespeist wird. Die Ergebnisse gelten damit – dies sei auch nicht erwartet - in vielen Teilen nicht gleichermaßen für kleinere, landwirtschaftlich geführte Anlagen, die oftmals noch einen anderen Stand der Technik haben, was in anderen Ergebnissen der Öko-Bilanz resultieren kann.

## 2 Substratbereitstellung: Optionen der deutschen Landwirtschaft

Als Substrate für die Vergärung zu Biogas kommen grundsätzlich unterschiedliche Pflanzen wie Mais, Getreide, Grassilage etc. in Frage, aber auch tierische Exkremente und biologische Abfälle. Die neue Anlagengeneration, die Biomethan zur Einspeisung produziert, nutzt derzeit aber vorrangig solche Substrate, die gezielt für diesen Zweck angebaut worden sind – auf diese Art kann die Versorgung mit ausreichend Inputmaterial am besten sichergestellt werden, da Reststoffe in ihrem Mengenpotenzial begrenzt sind.

Derzeit wird vor allem Mais als Substrat eingesetzt. In dieser Pflanze werden dreierlei Vorteile miteinander verbunden: hohe Felderträge und Rohgasausbeuten bieten günstige Voraussetzungen zur Biogasproduktion, es bestehen langjährige Erfahrungen in Anbau und Pflege sowie ökonomische Attraktivität durch ausreichende Gewinnbeiträge. Mit steigender Anzahl und Größe der Biogasanlagen auf Nawaro-Basis wird daher zunehmend die „Monokultur Mais“ als Gefahr diskutiert, wenn dabei die gute fachliche Praxis mehrgliedriger Fruchtfolgen für den ausschließlichen Anbau von Mais aufgegeben wird. Verstärkte Anfälligkeit und Befall von Schädlingen, aber vor allem Verlust von Biodiversität und Artenvielfalt können die Folge sein. Besonders der Maiswurzelbohrer, der ausgehend von Frankreich, sich anschickt die Grenzen zu überschreiten, kann zu einem erheblichen Anbaurisiko werden. Dabei existieren durchaus verschiedene Alternativen, um neben Mais andere Substrate für die Biogaserzeugung bereitzustellen, was bisher vielfach nicht genügend berücksichtigt wird. Das ist zum Teil darin begründet, dass diese Optionen sowohl aus pflanzenbaulicher und ökologischer, als auch aus ökonomischer Sicht noch nicht in gleichem Maße erforscht und bekannt sind wie Mais. Neben der Auswahl einzelner Pflanzenarten kommt vor allem der geschickten Kombination in regional angepassten Anbausystemen eine hohe Bedeutung zu.

Die in Kapitel 4 vorgestellten Fruchtfolgen sind so gewählt, dass die Biogassubstrate einen Anteil von rund 30–40 % der insgesamt angebauten Pflanzen haben, während der Rest aus handelsüblichen Marktfrüchten besteht. Als Biogassubstrate werden – neben Mais – Grünschnittroggen, Futterhirse und Ganzpflanzensilage (GPS) aus Wintertriticale und Wintergerste eingesetzt. Zudem werden die recht neuen Optionen eines Mischanbaus von Mais und Sonnenblumen und das Landsberger Gemenge, eine Mischung aus Zottelwicke, Welschem Weidelgras und Inkarnatklée, untersucht.

## 2.1 Substratbereitstellung in Fruchtfolgen: gute fachliche Praxis

Zur Erhaltung einer möglichst naturnahen Vielfalt von Pflanzen und Tieren ist es wichtig, mehrere Pflanzenarten zeitlich nacheinander auf einem Feld anzubauen. Eine mehrgliedrige Fruchtfolge hat typischerweise eine Rotationsdauer von drei bis fünf Jahren. Sie zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass im Laufe dieser Zeit abwechselnd Flach- und Tiefwurzler, Humusmehrer und Humuszehrer angebaut werden. Die Vorteile bestehen aus pflanzenbaulicher Sicht in einem verminderten Auftreten von Unkräutern sowie von Schädlingen und Pflanzenkrankheiten. Die Nährstoff- und Wasserausnutzung des Bodens ist im Vergleich zur Monokultur erhöht, die Erosionsgefahr nimmt dagegen ab. Durch Ausnutzung von positiven Vorfruchtwirkungen können höhere Erträge erzielt werden. Da davon auszugehen ist, dass sich unterschiedliche Felder in jeweils einem anderen Zyklus der Fruchtfolge befinden, werden stets diverse Pflanzen gleichzeitig angebaut, was zur Entzerrung von Arbeitsspitzen durch unterschiedliche Ernte- und Pflegezeitpunkte und zu einer höheren Ertragsleistung bei der Versorgung von Biogasanlagen mit Rohstoffen führt.

Gut geführte landwirtschaftliche Betriebe erhalten sich bei ihrer Anbaugestaltung eine gewisse Flexibilität, um auf den Markt zu reagieren. Fest in die Anbauplanung eingebunden sind in der Regel Grobfutter bei eigener Tierhaltung, Zuckerrüben (Quote) sowie Kartoffeln und Sonderkulturen. Letztere erfordern allerdings erhebliche Investitionen in Spezialtechnik für Anbau, Ernte und Aufbereitung. Flexibilität bei der Wahl der Fruchtarten besteht somit vorrangig bei den Marktfrüchten, d. h. Getreide und Ölsaaten.

## 2.2 Umwelteffekte der Substratbereitstellung

Die Anbauverfahren von Energiepflanzen sind häufig mit dem Anbau von „traditionellen“ Marktfrüchten<sup>5</sup> identisch. Die Einhaltung der guten fachlichen Praxis hat für den Anbau von Energiepflanzen genauso Gültigkeit wie für Marktfrüchte und den Futterbau. Gravierende negative Auswirkungen auf den Boden sind daher nicht zu erwarten. Auf die Entwicklung des Humushaushaltes im Boden muss allerdings geachtet werden [Warneke 2008].

Der Anbau von Energiepflanzen bringt sogar verschiedene Vorteile mit sich. So kann z.B. durch das Zweikulturnutzungssystem sowohl die Erosionsgefahr durch eine ganzjährige Bodenbedeckung gemindert werden, als auch die Auswaschungen von Stickstoff im Winterhalbjahr beim Anbau von winterharten Zwischenfrüchten reduziert werden. Des Weiteren ist eine bessere Ausnutzung der Winter-

---

<sup>5</sup> Marktfrüchte sind Obst-, Gemüse- oder Getreideerzeugnisse, die meistens zur Erzeugung von Nahrungsmitteln von landwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben angebaut werden.

niederschläge für eine zügige Ertragsbildung im Frühjahr gegeben. Zudem kann der Pflanzenschutzaufwand bei einigen Kulturen reduziert werden.

Bei Einhaltung eines regional angepassten Anbausystems besteht die Möglichkeit, die Fruchtfolge durch den Anbau von Biogassubstraten zu erweitern, so dass zur Förderung der Biodiversität beigetragen wird. Das gilt insbesondere für Regionen, in denen fast ausschließlich Marktfrüchte, wie z. B. in den Börden und Ackerebenen angebaut werden.

Allerdings entstehen durch die anzustrebenden hohen Biomasseerträge erhöhte Anforderungen an die Wasserversorgung, d. h. das pflanzenverfügbare Bodenwasser wird stärker beansprucht. Die Versickerung von Niederschlägen und damit die Auswaschung von Nährstoffen gehen zwar zurück, allerdings trifft dies auch auf die Grundwasserneubildung zu.

Einige Umwelteffekte, wie Auswirkungen der Anbausysteme auf die Humusbilanz, Erosionsgefahr durch Bodenbedeckung sowie die Biodiversität werden in den folgenden Abschnitten dargestellt. Auch der Bedarf an Betriebsmitteln wie der Einsatz von Maschinen sowie Dünge- und Pflanzenschutzmittel werden betrachtet.

### **2.2.1 Maschineneinsatz und Düngung**

Die Energiepflanzenproduktion unterscheidet sich hinsichtlich des Bedarfs an Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln nicht wesentlich vom Futterpflanzenbau für Wiederkäuer. Die Unterschiede liegen in einem vergleichsweise frühen Erntetermin, den niedrigen Anforderungen an die Schmackhaftigkeit bzw. kürzere Häcksellängen sowie in der Tatsache, dass auch in Grenzen ein tolerierbarer Anteil an Beikraut zur Methanbildung beiträgt. Ebenfalls ist eine geringere Energiedichte als bei der Fütterung notwendig. Diese Anforderungen ermöglichen die Einbeziehung einer größeren Anzahl an Pflanzenarten und eine geringere Intensität im Energiepflanzenbau.

Eine Verminderung des Pflanzenschutzmittelaufwandes ist bei Energiefruchtfolgegliedern wie dem Getreide zur Ganzpflanzennutzung gut möglich, da beizeitigem Erntetermin die meisten Unkräuter nicht zur Aussamung kommen. Trotz der früheren Ernten müssen hinsichtlich der Unkrautbekämpfung fruchtfolgehygienische Grundsätze berücksichtigt werden. Es sind das Aussamungspotenzial und die Bekämpfbarkeit der Unkräuter in den Folgekulturen zu beachten. Bei den Fungizidstrategien im Energiepflanzenbau ist je nach Befallsdruck eine Gesunderhaltung der oberen drei Blätter bis zur Milchreife anzustreben [Gebel 2006]. Da auch für GPS-Getreide zur besseren Ernte eine Lagervermeidung von Vorteil ist, besteht die Notwendigkeit einer Behandlung mit einem Wachstumsregler auf ertragsstarken Standorten.



Beim Anbau von Mais als Biogassubstrat sind keine Unterschiede zur herkömmlichen Silomaisproduktion zu erwarten. Die wichtigste Pflanzenschutzmaßnahme ist die termingerechte Unkrautbekämpfung, da der Mais, bedingt durch die kühleren Temperaturen im Frühjahr, einen verzögerten Reihenschluss hat. Bei Energiemais sind gegen tierische Schädlinge und Pilzkrankheiten die herkömmlichen Bekämpfungsmaßnahmen anzuwenden.

Der Biogasertrag wird durch den Biomasseertrag bestimmt. Die Inhaltsstoffe werden nur unwesentlich von Maßnahmen der Bestandsführung beeinflusst. Daher ist die Stickstoffdüngung ökonomisch und ökologisch so anzupassen, dass die Bestandsführung auf hohe und effiziente Erträge abzielt. Auf qualitätsbetonte Stickstoffspätgaben wie es beim Qualitätsgetreidebau (E-, A-Weizen) üblich ist, kann verzichtet werden.

### **2.2.2 Auswirkungen des Substratanbaus auf die Humusbilanz**

Die organischen Bestandteile setzen sich aus den Bodenorganismen, den lebenden Pflanzenwurzeln sowie den abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Biomassen, die als Humus bezeichnet werden, zusammen. Eines der wichtigsten Nachhaltigkeitsprinzipien zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist die Beibehaltung bzw. eine leichte Erhöhung des Humusstatus des Bodens. Humus macht 80 bis 90 % der Bodenbiomasse aus. Er befindet sich in einem laufenden Abbau-, Umbau- und Aufbauprozess. In den mineralischen Böden Deutschlands beträgt der Humusgehalt 1,5 bis 4 %. Anzustreben ist auf Ackerböden ein Humusgehalt von 2,5 %.

Durch die Zufuhr von organischem Material (z. B. Gülle, Gärreste, Stroh, Gründüngung) und den anfallenden Wurzelrückständen müssen die infolge der Mineralisierung auftretenden Humusdefizite ausgeglichen werden. Im landwirtschaftlichen Reproduktionsprozess wird immer eine ausgeglichene Humusbilanz angestrebt, d. h. der durch die Nutzung entnommene Kohlenstoff ist dem Kreislauf immer wieder zuzuführen. Prinzipiell ist dabei kein Unterschied zwischen einer Verwertung als Nahrungsmittel und als Bioenergierohstoff gegeben. Damit kann zwischen humuszehrenden und humuserhaltenden Bioenergieoptionen unterschieden werden. Beispielsweise wird bei einer Verbrennung von Stroh der Kohlenstoff komplett an die Atmosphäre als CO<sub>2</sub> abgegeben, wohingegen bei einem Einsatz der Pflanzen in Biogasanlagen ein erheblicher Teil des Kohlenstoffs durch die Rückführung der Gärreste im Kohlenstoffkreislauf verbleibt.

### **2.2.3 Auswirkungen auf Erosionsschutz durch Bodenbedeckung**

Bodenerosion kann sowohl durch Wind und Wasser verursacht werden. In beiden Fällen werden Teile des fruchtbaren Oberbodens (A-Horizont) abgetragen. Als Folge kommt es kurzfristig zu einer Degradierung der Böden mit negativen Auswirkungen auf die Ertragsfähigkeit. Des Weiteren befördert der Abtrag von Böden auch den Eintrag von Nährstoffen in Oberflächengewässer. Der kritisch anzusehende Phosphoreintrag in die Flüsse und Meere stammt vorrangig aus Bodenero-

sionen. Die Bodenbedeckung durch Pflanzen sowie deren Rückstände sind die im Ackerbau effektivsten und wirksamsten Methoden zur Erosionsminderung.

Verstärkte Erosionsgefahr besteht vor allem zum Ausgang des Winters, bedingt durch den oberflächlichen Wasserabfluss und während der Sommermonate durch sommerliche Starkregenfälle bei unbewachsenem Boden.

#### **2.2.4 Auswirkungen auf die Biodiversität**

Allgemeine Aussagen über die Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus, speziell der Biogassubstrate, auf die Biodiversität sind nur schwer zu treffen. Sicher ist jedoch, dass der Energiepflanzenanbau nicht nur Risiken, sondern auch wesentliche Gestaltungsmöglichkeiten und Chancen im Rahmen von Anbausystemen bietet. Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz geförderten Verbundvorhabens „Entwicklung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen“ (EVA) werden zurzeit grundlegende Untersuchungen zu ökologischen Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus durchgeführt. Ein wichtiges Teil-Ergebnis ist, dass Agrarflächen deutlich intensiver als Habitat genutzt werden, als angenommen. So konnten auf Untersuchungsflächen –angepasst an die jeweiligen Pflanzenarten– hohe Artenzahlen und Individuendichten festgestellt werden. Eine vielgestaltige Fruchtfolge bedingt demnach eine hohe Biodiversität im Agrarraum.

Zur Feststellung des Vorkommens wildlebender Pflanzen- und Tierarten ist jedoch nicht allein die Kulturart zu betrachten, vielmehr geht es um eine Betrachtung im jeweiligen räumlichen Kontext, d. h. neben Standort- und Bodeneigenschaften sind vor allem die jeweils benachbarten Strukturen einzubeziehen. Wichtigste Erkenntnis ist, dass in einer Kulturlandschaft jede Kulturart mit ihrem charakteristischen Anbauzeitraum, ihrer horizontalen und vertikalen Vegetationsstruktur oder den Blühzeitraum einen Beitrag zur Biodiversität leisten kann, der von dem Grad der Abweichung zu den jeweils benachbarten Kulturarten abhängt.

Je vielfältiger eine regionale Anbaustruktur ist, desto höher ist die Anzahl der Lebewesen, denen ein Lebensraum geboten werden kann. Daraus lässt sich für die Gestaltung von Fruchtfolgen, dass eine höhere Vielfalt in der Kombination von Fruchtfolgeelementen auch zu einer höheren Diversität führt. Diesen Effekt konnte [Glemnitz 2008] für Beikräuter, Laufkäfer, Spinnen und Blütenbesucher eindrucksvoll darstellen.

Daraus sind unter den Aspekten der Biodiversität im Wesentlichen zwei Aussagen abzuleiten:

- Der Anbau von Biogassubstraten kann dann zu einer höheren Biodiversität führen, wenn mit ihm eine höhere Vielfalt der Kulturarten in der Landschaft verbunden ist.

- Fruchtfolgen sind so zu gestalten, dass nicht nur hohe Biomasseerträge erzielt werden, sondern auch die Agrarlandschaft durch die Nutzung unterschiedlicher Kulturartengruppen und Anbauzeiträume bereichert wird.

Bei einer Untergliederung der Lebewesen in ökologische Gruppen, d. h. in Organismengruppen mit spezifischen ökologischen Funktionen, lassen sich keine Zusammenhänge zwischen der Vielfalt der Kulturarten und der Vielfalt der Gruppen nachweisen. Es zeigt sich aber, dass spezielle Kulturarten bestimmte Arten dieser ökologischen Gruppen fördern können [Glemnitz 2008]. Anschaulich lässt sich dies beispielsweise anhand der Gruppe der Blütenbesucher darstellen.

Aufgrund der unterschiedlichen Aktivitätszeiträume der jeweiligen Untergruppen, Bienen, Hummeln und Schwebfliegen ist der Schwerpunkt ihres Vorkommens in bestimmten Kulturarten stärker ausgeprägt. Eine stärkere Verlagerung zum Maisanbau kann z. B. zu einer geringeren Zahl von Hummeln, aber einer höheren von Schwebefliegen führen. Diese haben zusätzlich zur zentralen Bestäuberleistung eine wichtige Funktion bei der Kontrolle von Blattläusen, die sich vorwiegend in Maisbeständen finden. Durch die höhere Arten- und Individuenzahl von Schwebefliegen im verstärkten Maisanbau wird also gleichzeitig eine biologische Schädlingsbekämpfung von Blattläusen bewirkt.

Ein ähnliches Beispiel zeigt sich im Zusammenhang mit dem vorgezogenen Zeitpunkt der Ernte von Ganzpflanzengetreidebeständen gegenüber den Marktfruchtbeständen. Auf der einen Seite wird von Seiten des Vogelschutzes kritisiert, dass insbesondere bei einer Ernte im Mai bodenbrütende Vögel geschädigt werden können. Auf der anderen Seite zeigt sich, dass durch einen vorgezogenen Erntetermin das Aussamen von Unkrautarten verhindert und der Bestand an Unkräutern dadurch minimiert wird. Eine Einbindung von Ganzpflanzengetreiden in Fruchtfolgen kann so unter Umständen eine Strategie darstellen, den Herbizideinsatz, vor allem vor dem Hintergrund umfassender Resistenzen bei einigen Ungrasarten, z. B. Nachtschatten und Ackerfuchsschwanz zu senken. Die Wahl des Erntetermins stellt somit immer einen Kompromiss dar. Deshalb ist es günstig, mehrere Anbausysteme mit variierten Ernteterminen in einer Region zu etablieren.

Agrarökosysteme sind wichtige Lebensräume für eine Vielzahl von wild lebenden Organismen. Vor dem Hintergrund wissenschaftlicher Erkenntnisse bietet der Anbau von Biogassubstraten Gestaltungsmöglichkeiten und Chancen, Artenvielfalt und Biodiversität zu fördern, wenn er in regional angepassten Anbausystemen nach guter fachlicher Praxis erfolgt. Auf die Auswirkungen durch einen Monokulturanbau von z.B. Mais wird im Rahmen der Humusbilanz an den Modellstandorten (vgl. Abschnitt 4.2.2) eingegangen.

### 3 Technische Prozesskette „Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz“

#### 3.1 Beschreibung der Prozesskette

Um die Grundlagen für die Treibhausgasbilanz bei der Erzeugung von Biomethan zu legen, wird im folgenden Absatz vereinfacht die Prozesskette „Biomethan zur Einspeisung in das Erdgasnetz (frei Einspeisestelle)“ dargestellt. Die Prozesskette der Gewinnung von Biogas durch anaerobe Vergärung kann vereinfacht in die Abschnitte (1) Substratbereitstellung, (2) Fermentierung, (3) Aufbereitung, (4) Gärrestmanagement unterteilt werden –zur Orientierung grob skizziert in Abbildung 3-1<sup>6</sup>. Diese werden in den nächsten Abschnitten kurz beschrieben.

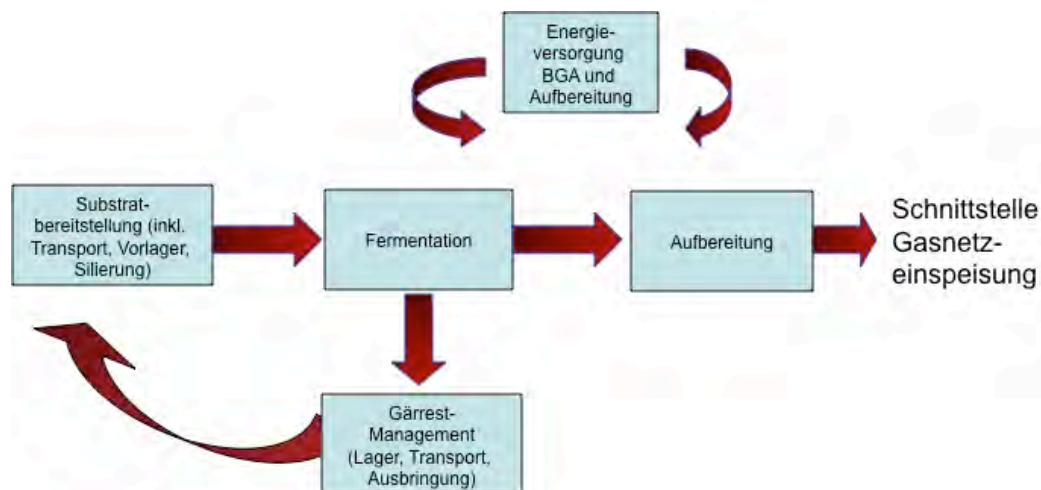


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Prozesskette Biomethan (eigene Darstellung)

#### Substratbereitstellung

Die Bereitstellung des Substrats wird an dieser Stelle nur schematisch skizziert. Auf die unterschiedlichen Pflanzen, die sich zur Biogaserzeugung eignen sowie die damit verbundenen unterschiedlichen Aufwendungen für Anbau und Ernte wird in Kapitel 4 detailliert eingegangen.

Das Substrat wird geerntet, in unmittelbarer Nähe der Biogasanlage im Silo eingelagert und mit Folie abgedeckt. Die Bevorratung großer Mengen Biomasse ist erforderlich, denn die Erträge aus einer oder maximal zwei Ernten pro Jahr (ab-

<sup>6</sup> Für eine detaillierte Abbildung der Prozesskette sei auf [Soukup, 2008] verwiesen.

hängig von den eingesetzten Substraten) müssen für den dauerhaften Volllastbetrieb der Biogasanlage bis zur nächsten Ernteperiode zur Verfügung stehen. Die abgedeckte Lagerung dient dabei als biochemische Konservierungsmethode [Soukup, 2008].

### **Fermentierung**

Aus dem Silo wird das Substrat dem Fermenter und dem eigentlichen Prozess der Gasbildung durch die zersetzenden und methanbildenden Mikroorganismen zugeführt, mit denen der Prozess bei erstmaliger Inbetriebnahme angeimpft wird. Bei Einsatz des weit verbreiteten kontinuierlichen oder quasi-kontinuierlichen Verfahrens<sup>7</sup> wird hierfür durch einen Rad- oder Teleskoplader zunächst ein Dosierer beschickt, der mit Förderschnecken automatisch für einen gleichmäßigen Eintrag der Silage in den Fermenter sorgt. Eine entsprechend große Menge an vergorenem Substrat verlässt gleichzeitig den Reaktor. Es entsteht ein gleichmäßiger Durchfluss, dessen Geschwindigkeit die durchschnittliche Verweildauer der Biomasse im Fermenter bestimmt. Beides ist von der Geschwindigkeit der Umsetzung des Substrats zu Biogas abhängig [Soukup, 2008].

Unabhängig von der technischen Ausführung verläuft die Biogasgewinnung immer unter Licht- und Sauerstoffabschluss nach dem gleichen Prinzip der anaeroben Fermentation in den vier Stufen der Hydrolyse (Zerlegung des Ausgangsmaterials in einfache organische Bausteine), Acidogenese (Bildung von niederen Fettsäuren), Acetogenese (Umwandlung der Zwischenprodukte zu hauptsächlich Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff) und Methanogenese (Methanbildung) [FNR, 2006].

### **Aufbereitung**

Das so entstandene Produktgas besteht hauptsächlich aus Kohlendioxid und Methan. Die Stoffkonzentrationen der einzelnen Bestandteile des Biogases können insbesondere in Abhängigkeit von den Nährstoffzusammensetzungen der Ausgangssubstrate und der Betriebsführung der Anlage stark variieren. Um eine Einspeisung ins Erdgasnetz realisieren zu können, müssen die technischen Eigenschaften des Rohbiogases an die des Erdgases angepasst werden. Das bedeutet, es muss entschwefelt und getrocknet werden und das Kohlendioxid muss fast vollständig aus dem Gas entfernt werden. Hierdurch wird ein Methangehalt von bis zu

---

<sup>7</sup> Daneben werden auch diskontinuierliche Verfahren eingesetzt, d.h. die vollständige Befüllung eines Fermenters erfolgt in einem Arbeitsgang. Zudem existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Fermenterbauformen: stehende oder liegende Behälter aus Beton oder Stahl in verschiedenen Größen, oft ausgerüstet mit unterschiedlichsten Rührwerken zur Substratdurchmischung. In Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt des Fermentationsraumes wird zwischen Nass- und Trockenfermentation unterschieden.

96 % und mit annähernd 10 kWh/m<sup>3</sup> der Heizwert von Erdgas H erreicht [FNR, 2008].

Für die CO<sub>2</sub>-Abtrennung sind bereits einige Verfahren verfügbar, unter denen die Druckwasserwäsche (DWW) und die Druckwechseladsorption (*Pressure Swing Adsorption*, PSA) technisch ausgereift und erprobt sind. Daneben sind verschiedene andere Verfahren, wie chemische Wäschen (Aminwäsche) und Membrantrennverfahren oder absorptive Trennverfahren in der Forschung und Entwicklung. Unter diesen ist die Aminwäsche am weitesten erprobt, wenn auch noch technische Fragen offen sind. Bisher zeigen die Vergleiche der Verfahren, dass mit der Aminwäsche die höchste Produktgasqualität mit den geringsten Methanverlusten („Schlupf“) erreichbar ist, während gleichzeitig der spezifische Strombedarf für den Prozess geringer ist als bei DWW und PSA. Allerdings benötigt die Aminwäsche im Gegensatz zu den beiden etablierten Verfahren Prozesswärme, so dass sich die Anwendung nur lohnt, wenn günstige (regenerative) Wärme zur Verfügung steht [UMSICHT, 2008].

Im Anschluss an die biogasspezifische Aufbereitung sind weitere Konditionierungsschritte erforderlich: Der Druck des Gases muss an der Einspeisestelle oberhalb des Leitungsdrucks liegen, was in einer Gasdruckregel- und Messanlage sichergestellt wird. Eingespeist wird üblicherweise in ein Netz mittlerer Druckstufe, wie im Fall der hier dargestellten Anlage bei 16 bar<sup>8</sup>. In einer zusätzlichen Gasbeschaffenheitsmessung werden die brenntechnischen Kenndaten des Gases überprüft und können bei Bedarf durch Zugabe von Konditionierungsgas präzise eingestellt werden. Schließlich erfolgt durch Beimischung von Geruchsstoffen eine aus Sicherheitsgründen vorgeschriebene Odorierung des bis dahin geruchlosen Gases [Wuppertal Institut, 2006].

## **Gärrestmanagement**

Nach einer gewissen Verweildauer im Fermenter wird das dann weitgehend ausgefaulte Ausgangssubstrat, das jetzt als Gärrest bezeichnet wird, in einen Nachgärbehälter und schließlich in ein Gärrestlager überführt. Auch hier findet nach dem oben beschriebenen Prinzip noch Neubildung von Biogas statt, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß. Moderne Biogasanlagen verfügen über ein abgedecktes Gärrestlager. Unkontrolliertes Entweichen methanhaltiger und damit stark klimawirksamer Gase in die Atmosphäre wird so verhindert.

Die Mineralstoffe, die von den Energiepflanzen während ihres Wachstums aufgenommen wurden, bleiben nach der Fermentation zu einem Großteil im Gärrest zurück, so dass bei Rückführung dieses Gärrests von einem annähernd geschlossenen Nährstoffkreislauf ausgegangen werden kann. Als Wirtschaftsdünger ersetzt

---

<sup>8</sup> <http://www.biogaspartner.de/index.php?id=11070&L=axdixyfwre>

das ausgefaulte Substrat hier zumindest teilweise den Zukauf von großtechnisch hergestellten Mineraldüngern: nach [Gutser, 2008] kann davon ausgegangen werden, dass der ausgebrachte Gärrest einen Düngewert von 50 - 70 % gegenüber dem mineralischen Stickstoffdünger beinhaltet. Damit senkt die Gärrestnutzung die Kosten des Substratanbaus und reduziert die Umweltbelastung aus den Vor Ketten der Düngemittelproduktion. Eine entsprechende Gutschrift wird in die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen mit eingeschlossen.

Die Möglichkeit, den Gärrest zu nutzen und so einen annähernd geschlossenen Nährstoffkreislauf zu fahren, hebt die Biogas- / Biomethanproduktion positiv von anderen Biomassenutzungs-Optionen wie z.B. den Biokraftstoffen der ersten Generation ab, bei denen dies weitgehend nicht möglich ist.

### **3.2 Bilanz der Treibhausgas-Emissionen – Fokus Anlagentechnik**

Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Biomethanbereitstellung wird zwischen zwei Anlagentypen unterschieden: (1) einer großmaßstäblich geführten Anlage nach heutigem „Stand der Technik“, die eine durchschnittlich effektive Biogasanlage im Jahr 2008 im industriellen Maßstab abbildet und (2) einer Anlage, die als „Optimierte Technik“ das aus heutiger Sicht und für die nahe Zukunft denkbare Optimierungspotenzial so weit wie möglich ausschöpft. Bei dieser Letztgenannten handelt es sich um einen Anlagentyp, der bereits stellvertretend für die nächste Generation an Biogasanlagen steht. Als Rohstoff wird zunächst wiederum exemplarisch von Mais ausgegangen, eine Detaillierung bezüglich anderer Substrate erfolgt in Kapitel 4.

#### **3.2.1 Ableitung der Emissionsfaktoren für die Biomethan-Prozesskette**

Bei allen Schritten der o.g. Prozesskette können Treibhausgasemissionen entstehen: entweder indirekt durch den Verbrauch an Strom und Wärme, oder direkt durch Entweichen von Gas. Am stärksten schlagen direkte Leckagen von Methan zu Buche, da das Gas eine vielfach höhere Klimawirksamkeit als Kohlendioxid aufweist. Spezifisch noch klimawirksamer sind allerdings die Ausgasungen von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ), die im Zuge des Substrat- und Gärresthandlings auftreten. Außerdem muss für die Gesamtbetrachtung das Nebenprodukt Gärrest berücksichtigt werden. Dessen Nutzung anstelle von Mineraldüngern verbessert sowohl die ökonomische, als auch die Emissionsbilanz.

Im Folgenden werden die emissionsrelevanten Parameter der jeweiligen Prozessschritte diskutiert und Emissionsfaktoren für die beiden hier betrachteten Anlagentypen „Stand der Technik“ und „Optimierte Technik“ abgeleitet. Die für die Prozessschritte getroffenen Annahmen werden nachfolgend erläutert.

Die Parameter, die für die beiden Anlagentypen oder Anlagenkonfigurationen unterschiedlich gewählt sind, sind (1) die Silierungsverluste im Vorlager, (2) die diffusen Methanverluste im Fermenter, (3) der Rohgasertrag und (4) der Anteil an Ammonium-N im Gärrestlager. Diese sind zur besseren Orientierung in Tabelle 3-1 fett gedruckt.

Tabelle 3-1: Eingangsparmeter der beiden Anlagentypen für die Ökobilanz (eigene Darstellung)

			Stand d. Technik	Optimierte Technik
<b>Substrat- bereitstellung*</b>	Dieseleinsatz	l/ha	82,9	82,9
	N-Dünger	kg/ha	141,75	141,75
	Silierungsverluste im Vorlager	Massen %	<b>15</b>	<b>5</b>
	N <sub>2</sub> O Emissionen Boden	%**	1	1
<b>Fermenter</b>	Gasverlust BGA	Vol %	<b>1</b>	<b>0,5</b>
	Rohgasertrag	m <sup>3</sup> / t FM	<b>200</b>	<b>220</b>
<b>Gärrest- management</b>	Gasverlust Lager	%	0	0
	NH <sub>4</sub> -N Anteil	%	<b>60</b>	<b>80</b>
	Ersatz von N-Dünger (mineralisch)	%	70	70
	Ersatz von K,P-Dünger (mineralisch)	%	100	100
<b>Auf- bereitung</b>	Methanverlust	%	2	2
	Restemission	%	0,01	0,01
<b>Energiebedarf</b>	Strombedarf BGA	kWh el/ t FM	36	36
	Wärmebedarf BGA	kWh th/ t FM	83	83
	Strombedarf PSA	kWh el/m <sup>3</sup> BG	0,3	0,3
	Wärmebedarf PSA	kWh th/m <sup>3</sup> BG	0	0

\*exemplarisch für Mais, noch ohne Anrechnung Gärrest

\*\* berechnet in % des ausgebrachten Stickstoff-Düngers

#### ■ Substratbereitstellung:

Die Substratbereitstellung beinhaltet den Anbau und die Ernte der Substrate sowie die Silierung im Vorlager. Da an dieser Stelle die Darstellung der Anlagentechnik im Vordergrund steht, wird noch keine Differenzierung nach unterschiedlichen Substraten oder hinsichtlich der beiden Anlagentypen vorgenommen. Exemplarisch wird die Bereitstellung von Mais als Biogassubstrat angesetzt.

Entscheidend für die THG-Emissionen, die der Anbau des Substrats mit sich bringt, sind -neben dem Einsatz von Diesel für die Aussaat sowie die Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmittel- die Aufwendungen für Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumdünger, sowie für Magnesium, Kalk,



Pflanzenschutzmittel und Saatgut. In Tabelle 3-1 sind von diesen nur der Dieseleinsatz und Stickstoff-Dünger als wichtigste Parameter aufgeführt, die den größten Anteil an den THG-Emissionen bilden. Diese Werte wurden von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) bestimmt und bilden die Situation an einem definierten Ackerstandort in Deutschland ab. Weitere Ausführungen dazu folgen in Kapitel 4.

Zudem wurden Ausgasungen von Lachgas in Höhe von 1 % des ausgebrachten Stickstoffdüngers als THG-Emissionen in die Bilanz einbezogen [IPCC, 2006; IPCC, 2007]<sup>9</sup>.

Nach Angaben von [KTBL, 2007] treten bei der Silierung des frischen Rohstoffs Verluste in der Größenordnung von 5-20 Massen % auf. Für den heute gängigen Stand der Technik wurde ein Erfahrungswert von 15 % angesetzt. Für das Optimum wird ein Wert von 5 % angesetzt, der sich leicht konservativ aus den nach [Ifeu, 2008] „unvermeidbaren“ Silierungsverlusten von 3 - 6 % ableitet.

■ **Fermenter:**

Im Fermenter kann es bei der Umsetzung der Substrate zu Methan in Folge von Undichtigkeiten, Diffusion aus gasführenden Anlagenteilen oder aber durch Betriebsstörungen zu Leckagen kommen. Zur genauen Höhe dieser Leckagen besteht Forschungsbedarf, da hier noch keine exakten Messergebnisse vorliegen. Diese diffusen Methanemissionen aus der Biogasanlage selbst werden im Rahmen der Anforderungen an den Emissionsschutz, z.B. der Technischen Anweisung: Luft, bislang kaum thematisiert [Landesumweltamt Brandenburg, 2008]. Es wird analog zum Vorgehen in der Literatur [LFL, 2007] bis zum Vorliegen genauerer Daten pauschal 1 % der Methanproduktion als Stand der Technik angesetzt. Als Annahme für die Anlage nach optimierter Technik wird dieser Wert halbiert, um ein Optimum abzubilden.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Rohgasertrag, der angibt, wie viel Methan aus der eingebrachten Frischmasse (FM) erzeugt werden kann. Dies ist in weiten Teilen von der Art und Qualität des Substrats abhängig, aber auch die Ausführung des Fermenters und insbesondere das Gärvolumen haben einen Einfluss darauf<sup>10</sup>. Bislang wird für Mais als Eingangsstoff nach Empfehlungen aus [FNR, 2006] mit einem Rohgasertrag für Mais von rund 200 m<sup>3</sup>/tFM gerechnet. Erfahrung von Anlagenbetreibern zeigen aber bereits jetzt schon, dass um 10 – 18 % höhere Gasausbeuten

<sup>9</sup> Siehe auch Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 5.3.

<sup>10</sup> vgl. [<http://www.biogas-netzeinspeisung.at/technische-planung/biogasgestehung/gasertraege1.html>]

realisierbar sind. Für die Anlage nach optimierter Technik ist daher ein Wert von 220 m<sup>3</sup>/t FM angesetzt worden.

- **Gärrestmanagement:**

Beide hier beschriebenen Anlagenkonfigurationen orientieren sich an großmaßstäblichen und modernen Biogasanlagen, die professionell betrieben werden. Aus diesem Grund wird für beide Anlagentypen ein vollständig abgedecktes Gärrestlager vorgesehen, bei dem die Methanemissionen durch Erfassung und Nutzung bzw. Abfackeln nahezu vollständig vermieden werden. Die Auswirkungen, die Emissionen aus einem nicht abgedeckten Gärrestlager auf die gesamte Bilanz haben, werden nichtsdestotrotz in einer Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 3.2.3 demonstriert.

Indirekt emissionsrelevant ist auch der Stickstoffkreislauf, da je nach Anteil von direkt pflanzenverfügbarem Ammonium am Stickstoff mehr oder weniger große Mengen an Mineraldüngern substituiert werden. In Abhängigkeit von der Gasbildung (Ertrag und Methangehalt) wird auch der mit dem Substrat eingebrachte Stickstoff umgewandelt. Hauptprodukte sind dabei Ammoniak und Ammonium. Basierend auf Experten-Schätzungen wird für die Anlage nach dem Stand der Technik ein Anteil von 60 % an direkt pflanzenverfügbarem Ammonium am Stickstoff im Gärrest angenommen bzw. ein Anteil von 80 % für die Anlage nach optimierter Technik.

Der ausgebrachte Gärrest hat, wie beschrieben, einen Düngewert von 50 - 70 % gegenüber dem mineralischen Stickstoffdünger [Gutser, 2008]. In der vorliegenden Arbeit ist mit einem mittleren Wert von 60 % gerechnet worden. Die übrigen Nährstoffe, wie Phosphor, Kalium und Magnesium werden im Fermenter nicht abgebaut und können vollständig den Einsatz von mineralischem Dünger substituieren. Für die Ausbringung des Gärrests wird ein geringer Mehrbedarf an Diesel benötigt, der im Fall der Gärrestnutzung mit einberechnet wird.

Es wird davon ausgegangen, dass die Ausbringung des Gärrests wie beschrieben erfolgt. In der Praxis zeigt sich allerdings, dass dieses Vorgehen zwar als sinnvoll bis notwendig erachtet wird, die vorhandenen Verfahren zur Aufbereitung und Ausbringung aber derzeit technisch noch nicht ausgereift sind und daher nicht dauerhaft zuverlässig funktionieren bzw. mit hohen Energieverbräuchen und dementsprechend hohen Betriebskosten verbunden sind [FNR, 2009].

- **Aufbereitung:**

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle mit der *Pressure Swing Adsorption* (PSA) nur ein Aufbereitungsverfahren exemplarisch be-

handelt. Von entscheidender Bedeutung ist der Methanverlust, der bei der Aufbereitung auftritt. Durch das Anfang 2009 novellierte EEG ist der zulässige Methanschluß auf 0,5 % begrenzt [Tschiedel, 2008]. Nur mit dem PSA Verfahren kann diese Vorgabe nicht eingehalten werden, da hier typischerweise ein Wert von rund 2 % erreicht wird [Urban, 2008]. Daher entspricht es dem derzeit gängigen Weg, eine Nachverbrennung hinter die Aufbereitungsanlage zu schalten, in der das entweichende Methan entweder thermisch oder katalytisch umgesetzt wird (siehe „Methanverlust“ und „Restemission“ in Tabelle 3-1. Da dies den seit Januar 2009 geltenden Vorgaben entspricht, wird an dieser Stelle kein Unterschied zwischen den beiden Anlagenkonfigurationen gemacht. Der Methanschluß wird als stofflicher Verlust von  $\text{CH}_4$  in die Atmosphäre in die THG-Bilanz einbezogen.

■ **Energiebedarf Biogasanlage und Aufbereitung:**

Wie aus dem einleitenden Abschnitt 3.1 hervorgeht, wird zum Betrieb der Biogasanlage Energie in Form von Wärme zur Beheizung des Reaktors sowie Strom für Beschickung, Rührwerk etc. verbraucht. Auch die Aufbereitung (hier: PSA) muss mit elektrischer und thermischer Energie versorgt werden.

Aufgrund der Angaben eines Betreibers einer großmaßstäblich geführten Biogas-Anlage zur Einspeisung sind die in Tabelle 3-1 aufgeführten Werte für den Energiebedarf der Biogasanlage angesetzt worden. Die Daten für die Aufbereitung sind [UMSICHT, 2008] entnommen. Für diese Werte wird keine Unterscheidung zwischen den beiden Anlagenkonfigurationen (Stand der Technik und Optimierte Technik) gemacht.

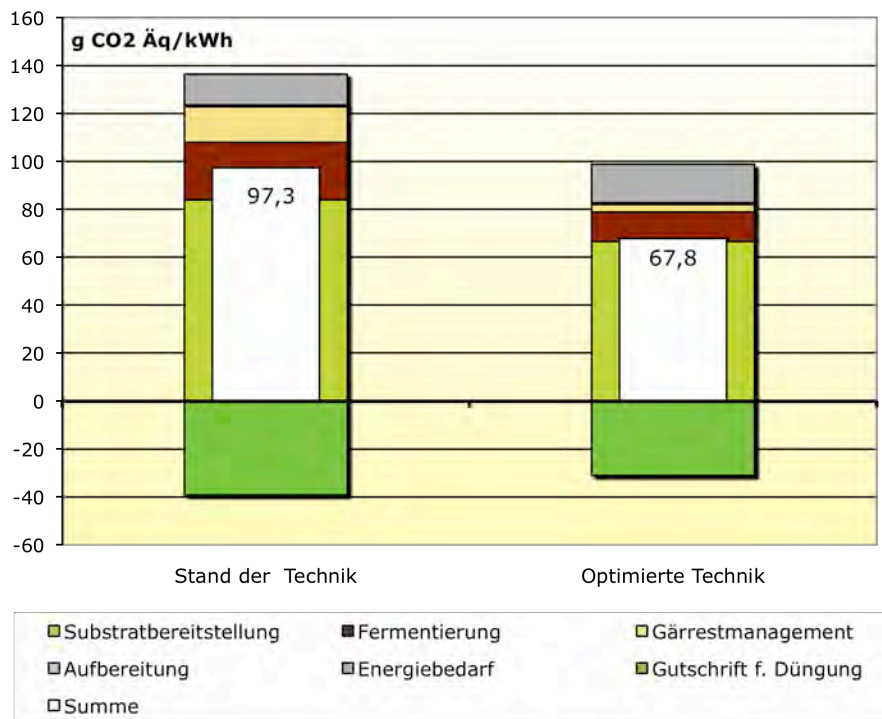
Im hier abgebildeten Fall wird die Energieversorgung beider Anlagenteile durch ein lokales BHKW gewährleistet, das einen Teil des erzeugten Biogases vor Ort unter Nutzung der Abwärme verstromt. Das dafür benötigte Biogas steht damit nicht mehr zur Einspeisung zur Verfügung.

### **3.2.2 Emissionsfaktoren der Biomethanprozesskette**

Obwohl beide beschriebenen Anlagenkonfigurationen mit einem durchaus industriellen Ansatz betrieben werden, ist der Unterschied in den resultierenden THG-Bilanzen doch deutlich (Abbildung 3-2). Im Gegensatz zum derzeitigen Stand der Technik können mit optimierter Anlagenführung wie im zweiten dargestellten Fall die THG-Emissionen aus der Bereitstellung von Biomethan von 97 g  $\text{CO}_2\text{-Äq/kWh}$  für den Stand der Technik auf 67 g  $\text{CO}_2\text{-Äq/kWh}$  für die optimierte Technik noch klar gesenkt werden.

Diese Differenz zwischen den beiden Konfigurationen ist im Wesentlichen aus der Kombination aus höheren Silageverlusten und geringerem Rohgasertrag beim

Stand der Technik zu erklären. Außerdem sind der höhere Methanverlust in der Biogasanlage, sowie das schlechtere Stickstoffhandling bei der Ausbringung des Gärrests sichtbar.



**Abbildung 3-2: THG Faktoren der Prozesskette Biomethan: Vergleich der beiden Anlagentypen**

Beiden Anlagentypen ist gemeinsam, dass die diffusen Emissionen aus dem Fermenter sowie die Energiebedarfsdeckung der Biogasanlage und Aufbereitung in etwa zu gleichen Teilen zur Klimabilanz bei tragen. Wird der Aufbereitung durch PSA eine Nachverbrennung hinzugeschaltet, wie es bei den abgebildeten Anlagen üblich ist, verringert sich der dann noch übrige Methanschlupf mit 0,01 % auf so geringe Emissionen, dass diese in der Bilanz kaum noch erkennbar sind.

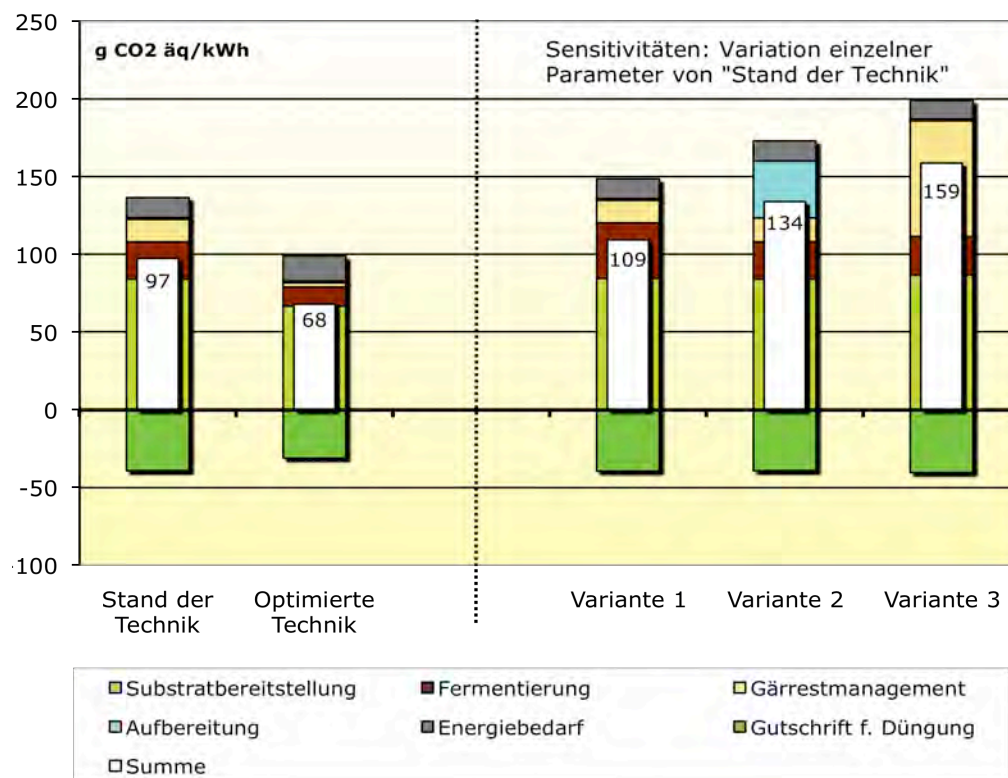
Den größten Anteil der THG-Emissionen stellen –in beiden Fällen bei schon recht weit optimierter Anlagentechnik– die Emissionen aus der Substratbereitstellung, also die Aufwendungen für Düngemittel, Pflanzenschutz, Saatgut sowie der entsprechende Maschineneinsatz zur Ausbringung der Betriebsmittel, der Ernte und dem Transport der Substrate zur Anlage. Das gilt auch, wenn die Gutschrift aus Rückführung des Gärrests auf die Substratbereitstellung angerechnet wird. Dieser Abschnitt der Prozesskette wird daher detailliert untersucht; die Ergebnisse werden in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

### 3.2.3 Anlagentechnik: Sensitivitäts-Analyse einzelner Parameter

Wie eingangs erwähnt, haben direkte Emissionen von Methan die höchsten Auswirkungen auf die THG-Bilanz der Prozesskette. Den Abschnitten, an denen es zu Leckagen von  $\text{CH}_4$  kommen kann, gebührt daher bei der Optimierung von Biogas-Anlagen besondere Aufmerksamkeit. Für die Anlage nach dem derzeitigen Stand der Technik sind drei dieser Abschnitte einer Sensitivitätsanalyse unterzogen worden:

- Variante 1: die diffusen Methanemissionen in der Biogasanlage werden von 1 % auf 1,5 % angehoben;
- Variante 2: die Restemissionen bei der Aufbereitung werden nicht nachträglich thermisch umgewandelt, so dass es bei 2 % Methanschlupf der PSA bleibt;
- Variante 3: es wird angenommen, dass das Gärrestlager nicht vollständig abgedeckt wird. An dieser Stelle sind recht moderate Ausgasungen von nur 2,5 % bezogen auf das produzierte Methan abgebildet worden. Erfahrungen aus der Praxis [FNR, 2005] zeigen, dass diese Werte eine Bandbreite zwischen 2,5 % bis hin zu 15 % annehmen können; in älteren und kleinen Biogasanlagen sind in vielen Fällen auch noch offene Gärrestlager zu finden. Diese Anlagen stehen hier aber nicht im Fokus der Untersuchungen. Der abgebildete Wert von 2,5 % wurde gewählt, um einen Eindruck von der Relevanz der Methanemissionen aus dem Gärrestlager zu vermitteln.

Diese Sensitivitätsanalyse erfolgt wohl wissend, dass zum Erhalt des Innovationsbonus im EEG sowohl eine Abdeckung des Gärrestlagers, als auch das zuvor beschriebene Maximum der Methanemissionen bei der Aufbereitung festgeschrieben sind. Allerdings ist eine Obergrenze für den Erhalt des Innovationsbonus von  $700 \text{ Nm}^3/\text{h}$  eingeführt worden [Loibl, 2009], so dass nicht mehr in jedem Fall automatisch davon ausgegangen werden kann, dass diese Vorgaben von allen Biomethananlagen eingehalten werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Abweichungen von den Vorgaben in einer Sensitivität zu untersuchen und die Auswirkungen deutlich zu machen.



**Abbildung 3-3: THG Faktoren der Prozesskette Biomethan: Sensitivitätsanalyse. Variante 1: erhöhte Methanverluste in BGA (1,5%); Variante 2: erhöhter Methanschlupf in Aufbereitung (keine Nachverbrennung); Variante 3: erhöhte Methanverluste im Gärrestlager (2,5% Emissionen)**

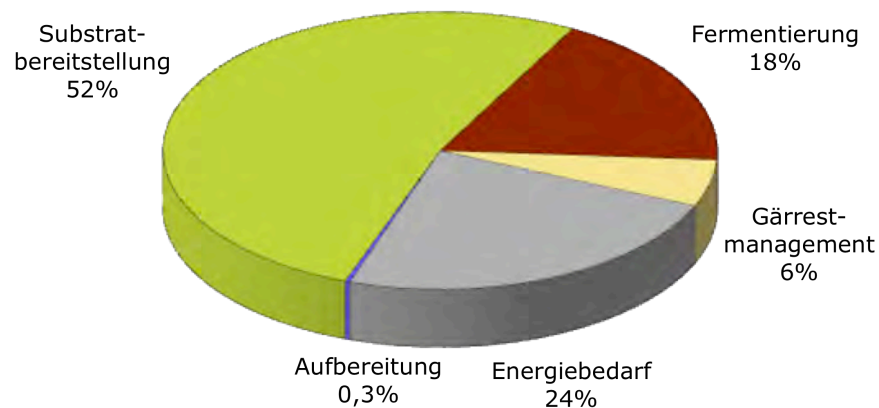
In jedem der drei Fälle steigen die THG-Emissionen pro kWh erzeugtem Biome-  
than gegenüber der Referenz deutlich an. Am stärksten schlagen die – in der Pra-  
xis immer noch geringfügigen – Ausgasungen aus dem Gärrestlager zu Buche.

### 3.3 Zwischenfazit

Bei optimierter Anlagentechnik kommt der Substratbereitstellung die höchste Be-  
deutung in der gesamten THG-Bilanz zu, wie in Abbildung 3-4 verdeutlicht wird.  
Die Rückführung des Gärrests auf den Acker ist hier bereits berücksichtigt. Wird  
statt der weitgehend optimierten Anlage der derzeitige Stand der Technik ange-  
setzt, ändert sich das Bild nur wenig: der Substratbereitstellung kommt nach der  
Optimierung der Anlagentechnik mit einem Anteil von rund 52 % ein noch höhe-  
rer Beitrag zu (Stand der Technik: 46 %), die Fermentierung selbst verliert mit  
18 % sogar noch weiter leicht an Bedeutung (Stand der Technik: 25 %).

Weitere Forschung bezüglich der Minimierung der THG-Bilanz von Biomethan  
sollte sich daher verstärkt mit der Bereitstellung der Substrate beschäftigen. Bis-  
her ist vielfach (wie auch im vorigen Abschnitt) vor allem mit Mais als gängig-  
stem Substrat und hier oft mit „Standard-“ oder Durchschnittswerten gerechnet

worden. Oft fehlt ein konkreter Bezug zu realen Bedingungen, die an wirklichen Standorten vorgefunden werden. Da in unterschiedlichen Regionen in Deutschland teils sehr unterschiedliche Rahmenbedingungen zum Anbau vorzufinden sind, wie z.B. der erzielbare Feldertrag, die notwendige Menge an Düngemittel etc., ist es notwendig, die zuvor genutzten Durchschnittswerte zu konkretisieren. Dies erfolgt im folgenden Kapitel 4.



**Abbildung 3-4: Aufteilung der THG-Emissionen der Prozesskette Biomethan nach den einzelnen Prozess-Abschnitten**

## 4 Klima- und Umwelteffekte durch Substrate aus regional angepassten Anbausystemen

Nachdem im vorigen Kapitel 3 die Grundlagen der technischen Prozesskette Biomethan sowie der Ableitung der Emissionsfaktoren auf Basis einer durchschnittlichen Vorkette für Mais gelegt worden sind, erfolgt in diesem Kapitel eine Spezifizierung der resultierenden Prozesskette für ausgewählte Modellregionen in Deutschland, indem die Bereitstellung von Substraten aus regional angepassten Anbausystemen in die Ökobilanz einbezogen wird.

Dazu werden zunächst die Modellstandorte ausgewählt und die jeweiligen Anbausysteme vorgestellt. Zu diesem Schritt gehört eine ebenfalls anbauspezifische Betrachtung der Umweltwirkungen, die mit den Fruchtfolgen verbunden sind. Im dritten Abschnitt des Kapitels (4.3) werden die Klimawirkungen von Biomethan an den Modellstandorten vorgestellt.

### 4.1 Ausgewählte Modellstandorte und Anbausysteme

Um einen Überblick über die Optionen der Substratbereitstellung in Deutschland zu gewinnen, sind fünf Modellstandorte gewählt worden, die einen möglichst großen Teil der deutschen Landwirtschaft abbilden. Dazu war es notwendig, größere zusammenhängende Regionen zu bilden, welche ähnliche Eigenschaften für die relevanten Parameter Bodenart, Niederschlag und Temperatur aufweisen. Als Grundlage wurde die Gebietsgliederung in Boden-Klima-Räume (BKR) der Biologischen Bundesanstalt und der Landesanstalten bzw. -kammern der Länder herangezogen. Diese Einteilung wurde getroffen, um die Durchführung und Auswertung agrarwissenschaftlicher Forschung und Beratung zu vereinfachen und zu optimieren [Roßberg et al. 2007].

#### 4.1.1 Kriterien zur Auswahl der betrachteten Regionen

Die getroffene Auswahl soll einen Überblick über die Regionen geben, an denen Biogassubstrate zusätzlich zur derzeitigen Produktion erzeugt werden können. Es wurden Ausschlusskriterien festgelegt, um einerseits eine zu hohe Konkurrenz zu anderen landwirtschaftlichen Produktionen (etwa der Tierhaltung) und andererseits eine weitere Intensivierung in bereits intensiv agrarisch genutzten Gebieten zu vermeiden. Außerdem soll ein gewisses Ertragsniveau gewährleistet werden. Damit sind folgende Kriterien zu beachten:

- **Anteil der Maisanbaufläche an der Ackerfläche:**  
Der Maisanteil in den betrachteten Regionen sollte derzeit nicht über 30% liegen (Erhebungen von 2007, Deutsches Mais Komitee [DMK, 2007], da sonst durch zusätzlichen Anbau eine sehr hohe Konzentration von Mais in den regionalen Fruchtfolge zu verzeichnen wäre.



- **Tierbesatz:**

Eine Dichte von 2,5 Großvieheinheiten je Hektar sollte nicht überschritten werden. In Regionen mit hohem Tierbesatz (z. B. in den Landkreisen Vechta, Cloppenburg, etc.) herrscht bereits eine hohe Flächenkonkurrenz bei der Erzeugung von Tierfutter und der Ausbringung der bei der Tierproduktion anfallenden Gülle. Dies spiegelt sich in einem überdurchschnittlich hohen Pachtpreinsniveau wider. Der Zubau großer Biogasanlagen in solchen Regionen würde die Flächenkonkurrenz weiter maßgeblich verschärfen. Das ist auch dann der Fall, wenn die Biogasanlage mit Energiepflanzen beschickt wird, da dann eine Konkurrenz um die benötigte Fläche zur Ausbringung der Gärreste mit der Fläche zur Ausbringung der Gülle entsteht.

- **Anbau von Sonderkulturen:**

Regionen, in denen ein großer Teil der landwirtschaftlichen Fläche für den Anbau von Sonderkulturen wie Obst, Wein und Gemüse genutzt wird, entfallen ebenfalls bei der Auswahl der Modellstandorte. Die erzielbaren Deckungsbeiträge bei der Substraterzeugung für Biogasanlagen können nicht mit denen der Sonderkulturen konkurrieren.

- **Erzielbare Felderträge:**

Die erzielbaren Erträge sind hauptsächlich von der Bodengüte, ausgedrückt durch die Ackerzahl (AZ), der Höhe des jährlichen Niederschlags und der Höhe der durchschnittlichen Jahrestemperatur abhängig. Daher wurden auch hier Restriktionen für die Modellstandorte festgelegt. Die Ackerzahl<sup>11</sup> sollte über 30 liegen, der jährliche Durchschnittsniederschlag über 550 mm.

Um die Umsetzbarkeit einer Großanlage auch auf schlechteren Standorten zu prüfen, floss der Standort Güterfelde mit einer AZ von 29 und einem jährlichen Niederschlag von 545 mm trotz Unterschreitung der Parameter als Grenzertragsstandort in die Betrachtung ein.

Für die Ermittlung der Modellregionen wurden zudem die Ertragsdaten der wichtigsten Ackerkulturen den Boden-Klima-Räumen zugeordnet. Dazu sind die Erträge der Ackerkulturen auf Gemeindeebene (als Mittelwert von 1999 bis 2005) ermittelt und anschließend als gewichtete Mittelwerte entsprechend ihrer Größe auf die Boden-Klima-Räume übertragen worden.

---

<sup>11</sup> Die Ackerzahl ist ein Maß für die Qualität einer Ackerfläche. Sie wird in Abhängigkeit von den Bodengegebenheiten sowie Klima und Geländeverhältnissen (z.B. Waldrandlage) ermittelt. Die Skala reicht von 7 (sehr schlecht) bis 100 (sehr gut), wobei der beste Boden in Deutschland (in der Magdeburger Börde) bei der Einführung der Ackerzahl mit 100 definiert wurde.

#### 4.1.2 Ausgewählte Regionen

Aufgrund der dargestellten Überlegungen, sind folgende Referenzstandorte ausgewählt worden (vgl. Abbildung 4-1): Haus Düsse im Landkreis Soest, Ascha im Landkreis Straubing-Bogen, Gülzow im Landkreis Güstrow, Dornburg im Saale-Holzland-Kreis und Güterfelde im Landkreis Potsdam-Mittelmark. Gesicherte Daten für die vorliegende Arbeit liegen für die letzt genannten vier Modellstandorte vor, da hier bereits Anbau- und Fruchtfolgeversuche unter Koordinierung der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft im Rahmen des Verbundprojektes EVA durchgeführt werden. Da das Landwirtschaftszentrum Haus Düsse im Landkreis Soest ebenfalls über langjährige landwirtschaftliche Versuchsdaten verfügt, kann hier ebenfalls auf umfangreiches Material zurückgegriffen werden.

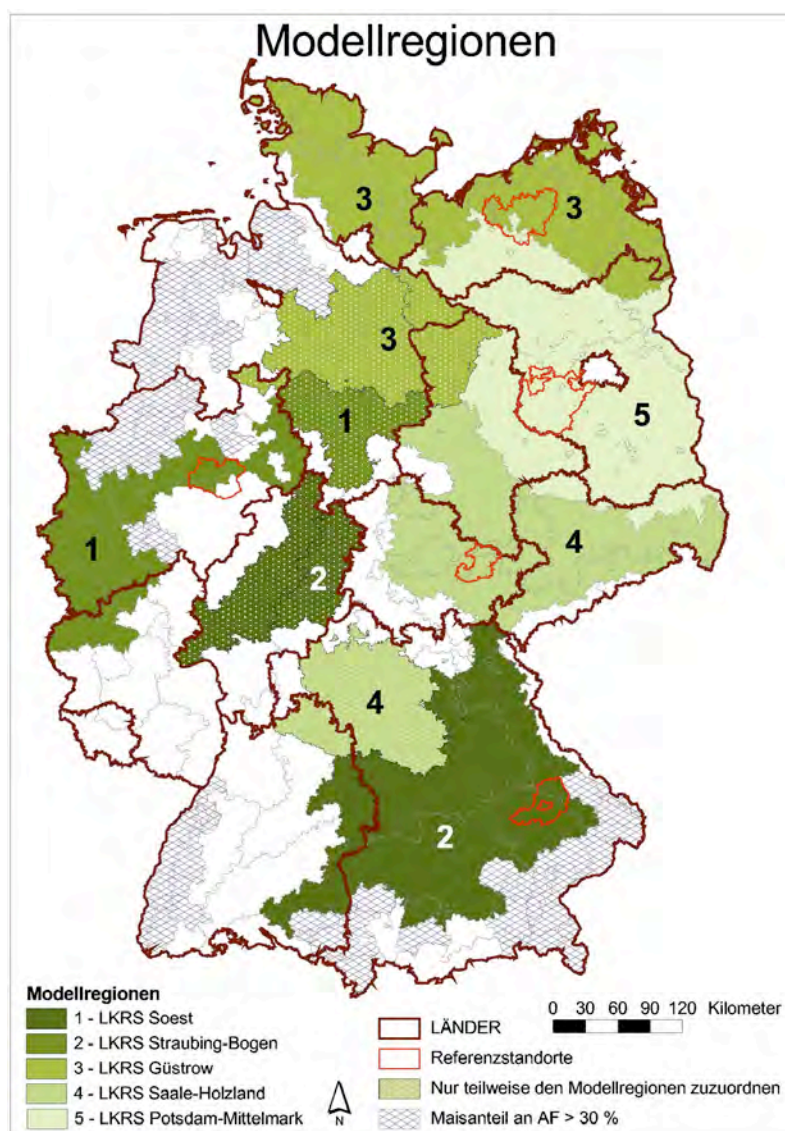


Abbildung 4-1:

Referenzstandorte in ausgewählten Regionen in Deutschland (eigene Darstellung)

Die Zahlen eins bis fünf sind den jeweiligen ausgewählten Modellregionen in Deutschland zugeteilt worden, die typische Anbauggebiete repräsentieren. In der Karte in Abbildung 4-1 finden sich die Zahlen zudem in schraffiert hinterlegten Regionen wieder. Diese Gebiete repräsentieren ähnliche Anbauregionen mit ähnlichen Rahmenbedingungen zur Substraterzeugung. Dabei sind mehrere Anbauregionen (Rossberg, et al., 2007) zusammengefasst worden, z. B. die Versuchsstation Dornburg (Nr. 4) mit den Anbaugebieten Lössböden in den Ackerebenen (Ost) und Lössböden in den Übergangslagen (Ost).

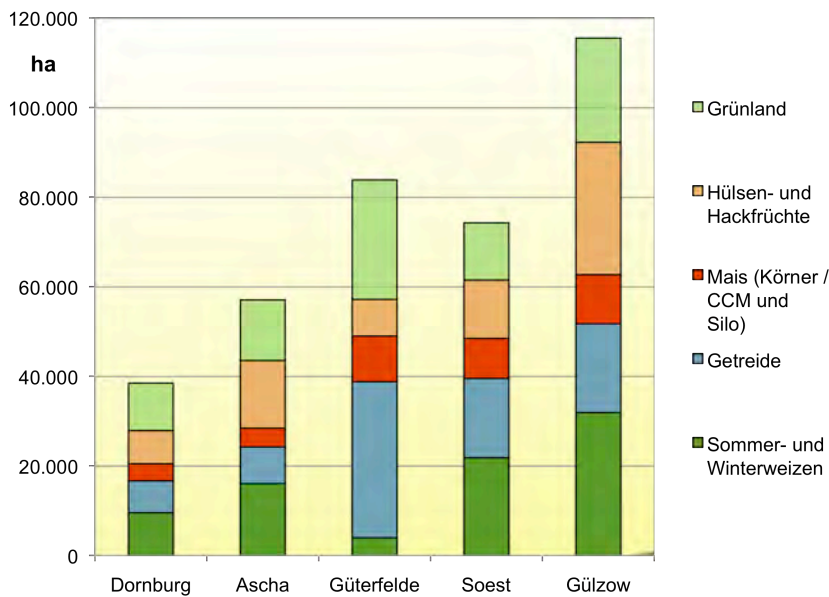
Einige Kenndaten der Referenzstandorte zeigt Tabelle 4-1. Auf der Grundlage des vorliegenden Datenmaterials werden im nächsten Abschnitt die regional angepassten Anbausysteme ermittelt.

Im Folgenden werden die Referenzstandorte exemplarisch für die Modellregionen betrachtet. Da aber die Modellregionen sehr großflächig sind und in relativ heterogenen Boden-Klima-Räumen liegen, ist die Übertragung der Standorteigenschaften von den Referenzstandorten auf die Modellregionen nur bedingt möglich.

Tabelle 4-1: Kenndaten der Referenzstandorte [eigene Erhebung]

Referenzstandort	Dornburg	Gülzow	Ascha	Soest	Güterfelde
<b>Ackerzahl</b> Ø	65	51	45	68	30
<b>Niederschlag</b> Ø [mm]	596	559	807	750	545
<b>Bodenart</b>	stark toniger Schluff	stark lehmiger Sand	lehmiger Sand	schluffiger Lehm	lehmiger Sand
<b>Silomaisertrag</b> [dt. FM/ha]	389-432	346-388	>472	>472	<345
<b>Betriebsgröße</b> Ø [ha] ab 20 ha	488	576	75	73	502

Die derzeitigen Anbauverhältnisse in den Referenzregionen zeigt Abbildung 4-2. Der Anbau von Winterweizen steht in allen Landkreisen der Modellstandorte, bis auf den Kreis Potsdam-Mittelmark, an erster Stelle. Hier ist Roggen mit Abstand die wichtigste Ackerfrucht, der Mais steht trotz niedriger Erträge mit einem Anbauumfang von über 8.000 ha an zweiter Stelle, gefolgt von Winterraps und Winterweizen. Im Landkreis Güstrow steht mit über 12.000 ha Wintergerste an zweiter und Silomais mit knapp 11.000 ha an dritter Stelle. In Soest sind Winterraps gefolgt von Körnermais die wichtigsten Ackerkulturen nach Winterweizen. Im Saale-Holzland-Kreis stehen Winterraps und Wintergerste im Anbauumfang nach Weizen. Zuckerrüben sind mit über 7.000 ha gefolgt von 5.536 ha Wintergerste die wichtigsten Ackerfrüchte nach Weizen im bayrischen Kreis Straubing-Bogen.



**Abbildung 4-2:** Anbauverhältnisse der Hauptfrucht an den Referenzstandorten (ohne Ackergras, Reb- und Obstflächen) in 2007 [Destatis 2008a, Destatis 2008b]

#### 4.1.3 Regionale Anbausysteme der Modellstandorte zur Produktion von Biogassubstrat

Die für die Modellstandorte angepassten Anbausysteme bzw. Fruchtfolgen sind so gebildet worden, dass sie auf die Erzeugung von Biogassubstraten ausgerichtet sind. Trotzdem soll die Substratproduktion nicht mehr als 30–40 % an der gesamten Fruchtfolge einnehmen, um dem Landwirt Flexibilität und Einkommenssicherung in seinem Betriebs zu erhalten. Die Erzeugung von Biogassubstraten soll sich möglichst unproblematisch in den konventionellen landwirtschaftlichen Betrieb eingliedern lassen. Regionale Besonderheiten und Ausprägungen werden bei der Zusammenstellung der Anbausysteme berücksichtigt.

Die mehrgliedrige Fruchtfolge ist so zu verstehen, dass diese in verschiedenen Betrieben gleichzeitig, aber über die Jahre versetzt angebaut wird, so dass die Biogasanlage in jedem Jahr mit der gleichen konstanten Substratzusammensetzung bedient werden kann. Das entspricht der heute gängigen Praxis der großen Nawaro-Biogasanlagen.

An allen Standorten kommt Mais zum Anbau, gefolgt von Futterroggen und Zuckerhirse an jeweils vier bzw. drei Standorten. Mit Ganzpflanzensilage (GPS) aus Wintertriticale bzw. Wintergerste sowie dem Ackergras bzw. Landsberger Gemenge und einem Mischanbau aus Mais und Sonnenblume werden an jeweils einem Standort Substrate getestet, die derzeit nicht in der Praxis gängig sind. Die einzelnen Fruchtfolgen werden im Folgenden kurz beschrieben; Abbildung 4-3 gibt einen Überblick. Darin sind die Biogassubstrate jeweils dunkler, die Markt-

früchte in helleren Farben dargestellt. Einen Ausblick auf zukünftig denkbare Optionen der Substratbereitstellung gibt Kapitel 6.1.

#### *4.1.3.1 Anbausystem Dornburg (Saale-Holzland-Kreis)*

Das standortspezifische Anbausystem für Dornburg beinhaltet die Substrate Mais, Futterroggen und Futterhirse sowie die Marktfrüchte Sommergerste, Winterraps, Winterweizen und die Zwischenfrucht Senf. Mais steht in Hauptkultur, da die Gefahr besteht, dass er bei den geringen Niederschlägen nicht sein volles Leistungspotenzial entfalten kann, wenn er in Kombination mit einer winterharten Vorfrucht angebaut wird. Nach Mais folgt eine Winterbrache, anschließend wird Sommergerste angebaut, die als Braugerste genutzt wird. Die Winterzwischenfrucht Futterroggen, als Substrat für die Biogasanlage, wird möglichst früh geerntet, um eine frühe Aussaat der Futterhirse zu gewährleisten. Die Sommergerste wird in der Region sehr häufig angebaut und findet daher Eingang in die Fruchtfolge. Senf verbleibt als abfrierende Winterzwischenfrucht auf dem Feld und dient somit als Erosionsschutz und Nährstoffspeicher. Die Kombination aus Winterzwischenfrucht und Futterhirse statt Mais dient gleichzeitig der Erhöhung der Ertragssicherheit.

#### *4.1.3.2 Anbausystem Gülzow (Landkreis Güstrow)*

Aus der Fruchtfolge für den Standort Gülzow sollen Mais, Wintertriticale (GPS) Mais-Sonnenblumen Gemenge und Futterroggen als Biogassubstrat genutzt werden. Die Fruchtfolgeglieder Wintergerste, Winterraps und Winterweizen werden in dieser Fruchtfolge als Marktfrucht angebaut. Wichtig ist es, die Wintertriticale, welche als Ganzpflanzensilage genutzt wird, zum optimalen Erntezeitpunkt mit 28 - 32 % TS zu ernten, um eine gut verdauliche Silage als Substrat sowie eine rechtzeitige Aussaat des Mais-Sonnenblumen Gemenges zu gewährleisten. Dieses hat gegenüber dem reinen Maisanbau den Vorteil, dass es bei einer Sommertrockenheit ertragsstabiler ist.

Die Biomasseerträge am Standort Gülzow fallen für die Region betrachtet etwas zu niedrig aus, was bei der Repräsentativität des Standortes für das Anbaubereich berücksichtigt werden muss.

#### *4.1.3.3 Anbausystem Güterfelde (Landkreis Potsdam-Mittelmark)*

Im Landkreis Potsdam-Mittelmark sind die Jahresniederschläge und das Wasserspeichervermögen im effektiven Wurzelraum sehr gering. Entsprechend wird das Anbausystem ausgelegt. Die Fruchtfolge zur Biogaserzeugung für Güterfelde beinhaltet Futterhirse, Mais und Futterroggen. Die Fruchtfolgeglieder Winterroggen und Raps werden zum weiteren Verkauf angebaut. Da die Futterhirse nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand geringe Ansprüche an die Wasserversorgung stellt, ist die Kombination aus frühräumenden Winterzwischenfrüchten (Futterroggen) mit frühem Zweitfruchtanbau (Futterhirse) zu empfehlen. Beim Anbau von Win-

terzwischenfrüchten kann es zu einer Wasserkonkurrenz gegenüber der Zweitkultur kommen. Daher steht der Mais in Hauptfruchtstellung, um den Bodenwasservorrat aus dem Winter für die Vegetation zu nutzen. Gleichzeitig werden dem Boden relativ viele Nährstoffe entzogen. Daher wird nachfolgend eine Populationsroggensorte angebaut, die geringere Ansprüche an den Boden stellt. Nach der Vorfrucht Raps kommt dagegen eine Hybridroggensorte zum Einsatz, da der Raps einen nährstoffreichen und gut durchwurzelten Boden hinterlässt und somit ideale Vorraussetzungen für einen hohen Roggenertrag liefert.

#### 4.1.3.4 *Anbausystem Ascha (Landkreis Straubing-Bogen)*

Das auf den Standort abgestimmte Anbausystem für Ascha beinhaltet Mais, das Ackergras oder Landsberger Gemenge sowie Futterroggen als Substrate. Daneben werden Winterweizen und Senf angebaut. Nach dem Futterroggen, der als Ganzpflanzensilage geerntet wird, folgt Mais. Beide Kulturen werden zur Biogasgewinnung angebaut. Da in diesem Landkreis im langjährigen Durchschnitt über 800 mm Niederschlag fallen, stellt der höhere Wasserbedarf bei zwei Ernten pro Jahr kein Problem dar. Im Anschluss wird das Feld mit Winterweizen als Marktf Frucht bestellt, gefolgt von dem Ackergras Landsberger Gemenge. Nach der Ernte der Winterzwischenfrucht im Mai wird als Zweitfrucht der Mais bestellt. Um einen hohen Biomasseertrag zu gewährleisten, ist es wichtig, eine spätsaatverträgliche Sorte zu wählen. Beide Kulturen werden nach der Ernte einsiliert und als Biogassubstrat verwendet. Danach kommt wieder eine Marktf Frucht (Winterweizen) mit anschließender Zwischenfrucht Senf, die abfriert und als Gründüngung auf dem Feld verbleibt. Als letztes Fruchtfolgeglied können je nach Marktgegebenheiten Kartoffeln oder Zuckerrüben eingesetzt werden. Nach den Zuckerrüben kann normalerweise, außer bei Frührodung, kein Futterroggen mehr angebaut werden, da die Ernte der Zuckerrüben zu spät für eine rechtzeitige Aussaat ist.

#### 4.1.3.5 *Anbausystem Haus Düsse (Landkreis Soest)*

Am Standort Soest werden die Substrate Wintergerste als GPS, Zuckerhirse sowie Mais in Hauptfruchtstellung angebaut. Daneben werden Winterweizen und Zuckerrüben als Marktf Früchte produziert. Zwischen Winterweizen und Zuckerrüben kommt Senf zur Aussaat. In Ausnahmejahren mit entsprechender Witterung kann auch dieser Aufwuchs geerntet werden und ebenfalls als Biogassubstrat Verwendung finden. Ist aufgrund schlechter Witterung der Aufwuchs von Senf zu gering, so dass eine Ernte unökonomisch ist, verbleibt der Senf als Erosionsschutz auf dem Feld. Wichtig ist die Verwendung von nematodenresistenten Senfsorten, um den Krankheitsdruck für die Zuckerrüben gering zu halten.



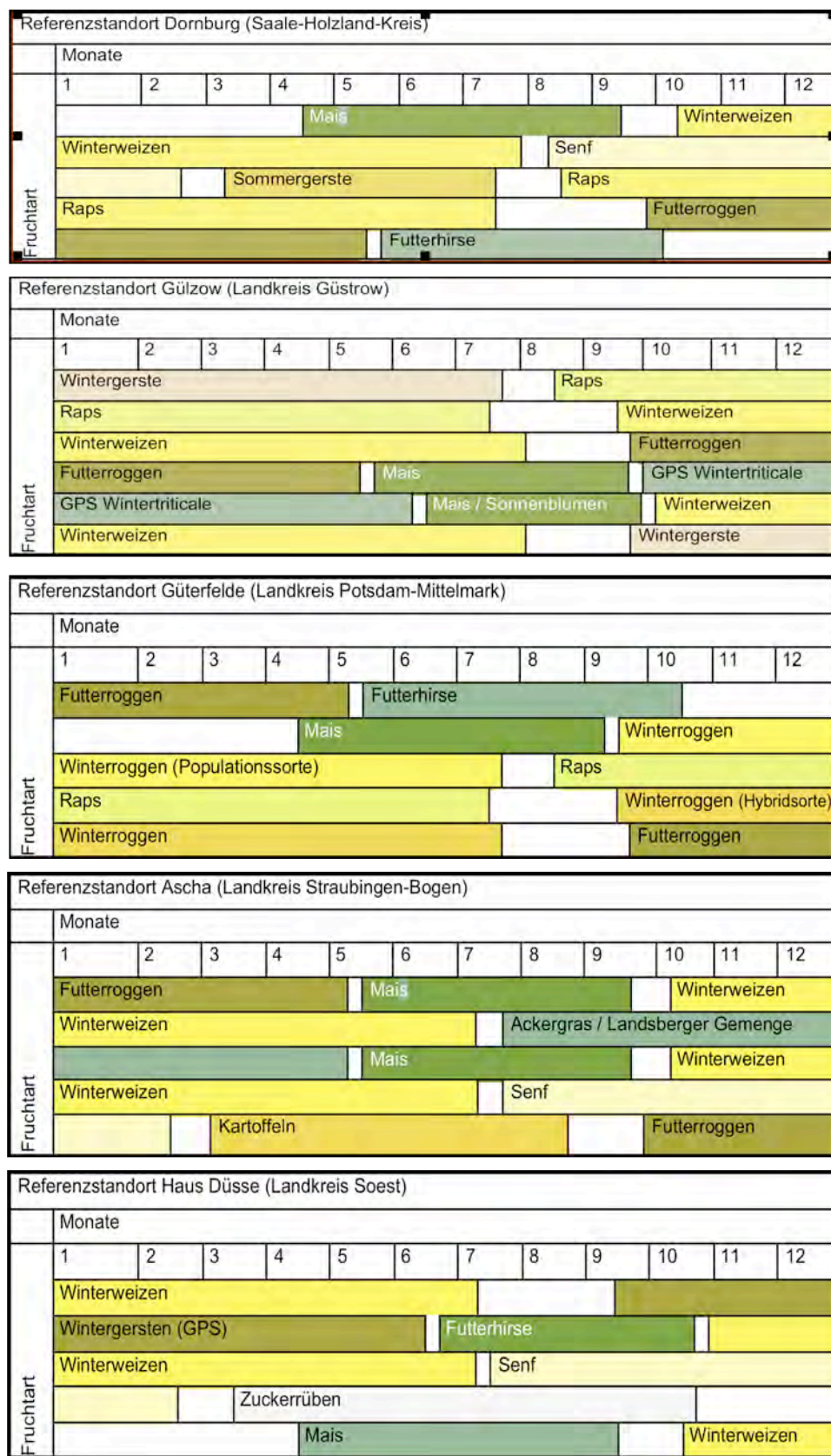


Abbildung 4-3: Fruchtfolgen der Modellstandorte (eigene Darstellung)

## 4.2 Umwelteffekte durch regional angepasste Fruchtfolgen an Modellstandorten

Die in Kapitel 2 vorgestellten Umweltbedingungen, die generell mit dem Anbau von Pflanzen verbunden sind, werden in den folgenden Abschnitten spezifisch für die regional angepassten Fruchtfolgen diskutiert.

### 4.2.1 Maschineneinsatz und Düngung

Wie es auch beim konventionellen Pflanzenbau der Fall ist, wird die Düngemittelgabe nach Entzug berechnet. Für die verschiedenen Referenzstandorte sind daher die langjährigen Ertragsmittel und Nährstoffgehalte der Pflanzen ausschlaggebend. Außerdem spielt der Nährstoffgehalt des Bodens eine Rolle, der sich ebenfalls je nach Standort unterscheidet. Die Düngemittelaufwendungen fallen dementsprechend je nach Referenzstandort und Substrat unterschiedlich hoch aus. Der Einsatz von Diesel in Arbeitsmaschinen zur Aussaat, Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmittel plus Pflege sowie zur Ernte ist ebenfalls von den Erträgen und Erntemengen sowie von der Schlaggröße und damit der landwirtschaftlichen Struktur abhängig. Hier ist zu beachten, dass sich die durchschnittliche Betriebsgröße der Referenzstandorte stark voneinander unterscheidet: aufgrund der historischen Entwicklung in den neuen und alten Bundesländern weisen die Referenzstandorte im Saale-Holzland-Kreis, im Landkreis Potsdam-Mittelmark und im Kreis Güstrow im Vergleich zu den Landkreisen Soest und Straubing-Bogen relativ wenige, dafür aber große landwirtschaftliche Betriebe auf [Statistisches Bundesamt, 2008]. Tabelle 4-2 gibt einen vergleichenden Überblick über die resultierenden Aufwendungen für den Pflanzenbau an zwei Referenzstandorten.

Tabelle 4-2: Aufwendungen für Anbau und Ernte verschiedener Substrate an zwei Standorten im Vergleich (eigene Darstellung)

		<b>Mais (HF)</b>		<b>Roggen</b>		<b>Hirse</b>	
		Dornburg	Güterfelde	Dornburg	Güterfelde	Dornburg	Güterfelde
<b>Feldertrag</b>	<b>t FM /ha</b>	<b>44,6</b>	<b>39,4</b>	<b>17,14</b>	<b>10</b>	<b>40,91</b>	<b>40,91</b>
Schlaggröße	ha	30	40	30	40	30	40
Dieseinsatz	l/ha	82,9	70,6	72,8	68,1	58,9	62,9
K-Dünger	kg/ha	222	198	98,7	57,6	152	152
P-Dünger	kg/ha	81,9	72	23,6	13,7	37,5	37,5
N-Dünger	kg/ha	141,8	139,6	68,6	40	73	93,2
Kalk	kg/ha	444	390	64	37,5	254	254
Magnesium	kg/ha	59,2	52	8,5	5,0	34,0	34,0
PSM	kg/ha	3,5	4,2	0	0	1,2	2,6
Saatgut	kg/ha	25	25	160	160	8	8
<b>N2O Boden</b>	<b>kg/ha</b>	<b>2,23</b>	<b>2,19</b>	<b>1,08</b>	<b>0,63</b>	<b>1,15</b>	<b>1,46</b>



#### 4.2.2 Auswirkungen des Substratanbaus auf die Humusbilanz

Mit der Humusbilanzierung wird ein Bilanzverfahren eingesetzt, um abzuschätzen, welchen Einfluss die aktuelle Bodennutzung auf die Entwicklung des Humusgehaltes des Bodens hat.

Für die Humusbilanzierung existieren verschiedene Methoden, welche die Einflussfaktoren auf den Auf- und Abbau unterschiedlich gewichten. In diesem Fall wurde die Humusbilanzierung nach der VDLUFA-Methode (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) mit den unteren Werten nach *Cross Compliance* durchgeführt [Körschens, 2004]. Eine Übersicht über die Humus-Saldogruppen sowie die Einstufung der langfristig erwartbaren Auswirkungen auf den Boden zeigt Tabelle 4-3.

Tabelle 4-3: Übersicht über Humus-Saldogruppen nach VDLUFA [Körschens, 2004]

Saldogruppe	Humusbilanz [kg Humus C / ha*a]	Einstufung
A	< - 200	sehr niedrig
B	-200 bis -76	niedrig
C	-75 kg bis 100	optimal
D	101 bis 300	hoch
E	> 300	sehr hoch

Bei Vorliegen der Saldogruppe A ist mit einer ungünstigen Beeinflussung der Bodenfunktion und Ertragsleistung zu rechnen, bei der Saldogruppe E besteht dagegen das Risiko für erhöhte Stickstoffverluste sowie eine niedrige Stickstoffeffizienz. Bei einem Humussaldo der Gruppe C ist die Humusbilanz als optimal einzustufen. Langfristig ist bei diesem Saldo mit der Einstellung standortangepasster Humusgehalte zu rechnen.

Die Bilanzen zeigen bei allen Fruchtfolgen sehr hohe Raten der Humuszehrung. Dies liegt vor allem daran, dass für die Erzeugung von Biogassubstraten die ganzen Pflanzen geerntet werden und kaum Nebenprodukte auf dem Acker verbleiben, woraus sich eine nicht ausgeglichene Humusbilanz ergibt. Da die Gärreste wichtige Pflanzennährstoffe wie Stickstoff, Kalium, Phosphor und Magnesium enthalten, ist es sinnvoll und notwendig, diese wieder auf den Acker auszubringen. Die Ausbringung der Gärreste, die noch einen großen Teil des ursprünglichen Kohlenstoffs enthalten, trägt zu zirka einem Viertel zum Ausgleich der Humusbilanz bei.

Der Anbau der Substrate stellt jedoch nur einen Anteil von 30-40 % an der gesamten Fruchtfolge, während konventionelle Marktfrüchte den überwiegenden Anteil ausmachen. Durch den zusätzlichen Verbleib der Erntereste dieser Marktfrüchte auf dem Acker, wie Stroh oder Rübenblatt, kann die Humusbilanz der gesamten

Fruchtfolge ausgeglichen werden. Die größte Bilanzkomponente mit positivem Vorzeichen bildet somit das Stroh (ca.  $\frac{3}{4}$  der Humusmehrung), das auf dem Acker verbleibt.

Eine Ausnahme bildet die Modellregion Güstrow: hier bleibt die Humusbilanz ausgeglichen, selbst wenn noch zusätzlich von zwei Fruchtfolgegliedern (Winterweizen und Wintergerste) das Stroh geborgen und einer anderen Verwertung zugeführt wird. Alle anderen Modellstandorte können aufgrund ihrer Humusbilanz der Humussaldogruppe C zugeordnet werden (siehe Tabelle 4-4), d. h. es ist eine optimale Versorgung gegeben.

Tabelle 4-4: Humusbilanz der Anbausysteme an den Referenzstandorten

Referenzstandort	Dornburg	Güterfelde	Gülzow	Ascha	Soest
<b>Humusbilanz*)</b> [kg Humus-C/ ha*a]	80	-24	183	-72	-59
<b>Humussaldo-Gruppe</b>	C	D	C	C	C

\*) Bei einem Humussaldo von -75 bis + 100 kg Humus pro ha und Jahr (Humussaldogruppe C) ist die Humusbilanz als optimal einzustufen. Langfristig ist bei diesem Saldo mit der Einstellung standortangepasster Humusgehalte zu rechnen [Köschens 2004].

Für den Fall, dass die Böden bereits den als optimal angesehenen standort- und nutzungstypischen Humusgehalt aufweisen, bedeutet dies, dass keine Humusanreicherung stattfinden sollte. Liegt jedoch, durch vorherige Nutzung bedingt, ein Humusgehalt unterhalb des Optimums vor, muss eine Humusanreicherung erfolgen. Befindet sich umgekehrt der Humusgehalt bereits über dem standort- und nutzungstypischen Optimum, können mit einer Reduzierung der auszubringenden Gärrestmenge die Salden verringert werden. Dies kann in der Praxis von Nachteil sein, wenn der Landwirt dann weiter entfernte Flächen mit einem größeren Transportaufwand zur Gärrestausrückführung nutzen muss. Diese Annahme des erhöhten Humusgehaltes kann nur in Betrieben mit sehr hohem Tierbesatz eintreten.

Unter der Annahme, dass 100 % der Gärreste wieder auf die Anbauflächen zurückkommen, sind ausgeglichene oder leicht negative Humussalden gegeben. Die absolute Höhe dieser Bilanzen hängt aber vom jeweiligen Standort und von der Höhe des Ertrages ab. Es sei außerdem darauf hingewiesen, dass in der Praxis durchaus Probleme bei der Ausbringung des Gärrests auftreten können, die eine vollständige Umsetzung behindern können [FNR, 2009], siehe auch Abschnitt 3.2.1.

Bei Mais in Monokultur ist die Bilanz in der Regel auf allen Standorten, trotz der Rückführung der Gärreste, leicht negativ.

### 4.2.3 Auswirkungen der Substraterzeugung auf den Erosionsschutz durch Bodenbedeckung

Die Bodenbedeckung ist neben der Intensität der Regenerosion und der Bodenbearbeitung (Management) ein wesentlicher Bestandteil des C-Faktors. Über die Fruchtfolge kann damit hauptsächlich auf die Erosionsrisiken Einfluss genommen werden.

Da zum Winterausgang eine erhöhte Erosionsgefahr besteht, ist die Bodenbedeckung durch Winterzwischenfrüchte ein Anhaltspunkt für die Einschätzung der Erosionsgefahr. Umso geringer die Zeiten im Jahresverlauf mit einer „Schwarzbrache“, d. h. wenn keine Begrünung vorhanden ist, desto geringer ist die Erosionsgefährdung. Da es für die Bewertung der Bodenbedeckung keine quantitative Methode gibt, erfolgt die Abschätzung auf empirischer Basis von Experteneinschätzungen [ZALF, 2009].

Die Anbausysteme in Soest und Güstrow haben keine Winterbrache und sind daher in diesem Zusammenhang als die Günstigsten anzusehen. In Ascha (Landkreis Straubing-Bogen) kann wegen der späten Ernte der Zuckerrüben keine winterharte Zwischenfrucht mehr etabliert werden, so dass diese Fruchtfolge nur als gut bewertet werden kann. In den Fruchtfolgen im Saale-Holzland-Kreis und im Landkreis Potsdam-Mittelmark wurde bewusst auf eine winterharte Zwischenfrucht verzichtet, da sonst die über Winter gespeicherte Wassermenge nicht für einen guten Maisertrag im Folgejahr reichen würde. Die geringere Bodenbedeckung muss daher in Kauf genommen werden. Allerdings konnte auf erosionsgefährdeten Standorten der Mais mit Untersaat bzw. als Engreihe ausgesät werden. Bei diesem Verfahren ist dann ebenfalls ein wirksamer Erosionsschutz gegeben.

Tabelle 4-5: Einschätzung der Bodenbedeckung der Anbausysteme an den Modellstandorten

Referenzstandort	Dornburg	Güterfelde	Gülzow	Ascha	Soest
<b>Bodenbedeckung (Erosionsschutz)</b>	gut	gut	sehr gut	gut	sehr gut

Für die Abschätzung der Erosionsgefahr im Sommer ist die Bodenbedeckung durch Reihenschluss der Feldfrüchte von Bedeutung: große Reihenweiten erhöhen die Erosionswahrscheinlichkeit. Die in den Fruchtfolgen angebauten C4-Pflanzen (Hirse und Mais) besitzen einen höheren Wärmebedarf. Das bedeutet, dass ihr Aufwuchs im Frühjahr verzögert ist und es erst im Frühsommer, d. h. relativ spät im Jahr zum Reihenschluss kommt. Deswegen ist der Bestand bis zum Reihenschluss erosionsgefährdet.

Der Anbau von Mais und Hirse sollte aufgrund der höheren Erosionsgefahr nur auf relativ ebenen Standorten und nach Möglichkeit unter Nutzung von Mulchverfahren erfolgen. Des Weiteren kann das Engsaatverfahren durch Halbierung des Reihenabstandes beim Maisanbau einen Beitrag zur Minderung der Erosion lei-

sten. Dieses Verfahren soll demnächst in mehreren Bundesländern gefördert werden. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist für den Hirseanbau eine Reihenentfernung von 50 cm optimal. Damit ist Hirse hinsichtlich der Erosionsgefährdung im Vergleich zum Mais (Reihenabstand 75 cm) positiver zu bewerten.

#### **4.2.4 Auswirkungen des Substratanbaus auf die Biodiversität**

Im Rahmen der hier dargestellten Arbeiten ist gezeigt worden, dass eine Erhöhung des Maisflächenanteils je nach betrachteter Region nicht zwingend negativ sein muss, sondern sogar zu einer Auflockerung der gängigen Fruchtfolgen beitragen kann. Bei Betrachtung der Anbauverhältnisse z.B. in der Untersuchungsregion Saale-Holzland-Kreis (Referenzstandort Dornburg) wird erkennbar, dass Silomais im Jahr 2007 auf rund 11 % der Ackerfläche (3.500 ha) angebaut wurde, während die Gesamtanbaufläche der Wintergetreidearten bei fast 50 % (15.000 ha) lag [TLS, 2007; vgl. Abbildung 4-2]. Eine Erhöhung des Maisflächenanteils bei gleichzeitiger Reduzierung des Wintergetreideanteils in der Fruchtfolge ist daher sogar mit einer Erhöhung der Biodiversität verbunden.

Nach Untersuchungen von [ZALF, 2009] im Rahmen des EVA-Projektes ist es nicht entscheidend, welche Fruchtart auf einer Fläche steht, sondern dass in einer bestimmten Region möglichst viele Fruchtarten gleichzeitig angebaut werden, was eine artenreiche Fruchtfolgegestaltung gewährleistet.

### **4.3 Klimaeffekte durch regional angepasste Fruchtfolgen an Modellstandorten (THG-Bilanz)**

Mit den Vorarbeiten aus den Kapiteln 3 sowie 4.1 und 4.2 erfolgt in diesem Abschnitt die vollständige Abbildung der THG-Emissionen aus der Bereitstellung von Biomethan zur Einspeisung an den betrachteten Modell-Standorten. Für die Vergärung der Substrate sowie die Aufbereitung zu Biomethan ist die Anlagenkonfiguration mit optimierter Technik angesetzt worden, wie sie in Abschnitt 2.2 dargestellt wurde.

Als Daten für die Rohgasausbeute der verschiedenen Substrate sind aber die etwas konservativeren Daten in die Berechnung eingegangen (vgl. Abbildung 4-4), die auf Veröffentlichungen der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe basieren [FNR, 2006]. Erfahrungswerte hinsichtlich einer höheren Ausbeute, wie sie für Mais vorliegen, sind nicht für alle betrachteten Substrate bekannt und können daher nicht gleichermaßen genutzt werden. Die Ergebnisse sind daher an dieser Stelle wahrscheinlich leicht unterschätzt bzw. die THG-Emissionen etwas zu hoch ausgewiesen, als es mit optimierter Technik zu erreichen ist.

Die spezifischen Biogasausbeuten verhalten sich unter den jeweils vorherrschenden Rahmenbedingungen bei der Biogaserzeugung, wie zum Beispiel Verweilzeit-

ten, Temperatur oder Anlagenbetriebsweise, sehr unterschiedlich. Die erzielbare Gasausbeute ist zudem von vielen Einzelfaktoren abhängig, wie etwa der Qualität der Silage und dem (wetterbedingten) Aufwuchs und Ernte der Substrate. Daher können die angenommenen Biogasausbeuten nur als Richtwert angesehen werden.

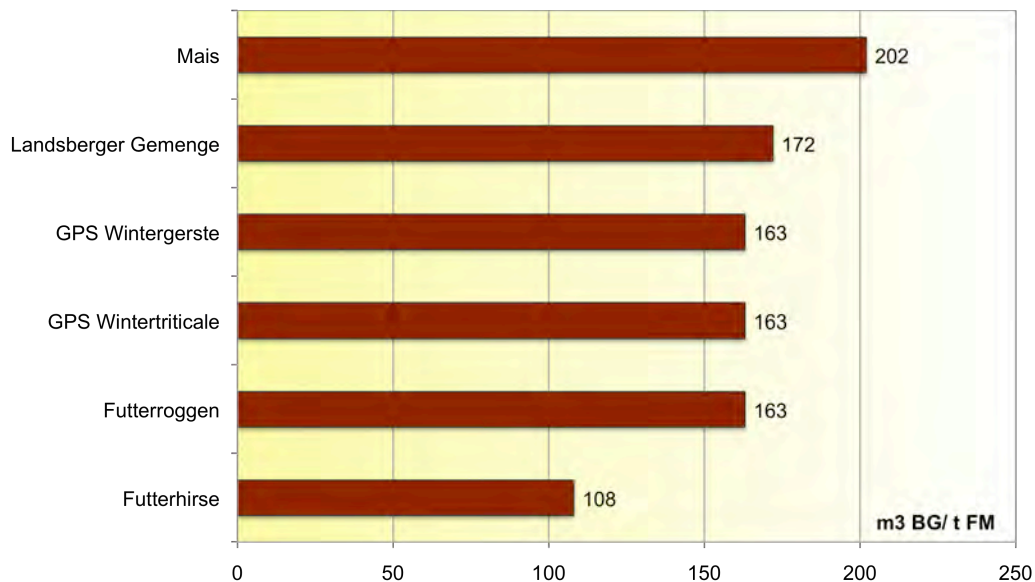
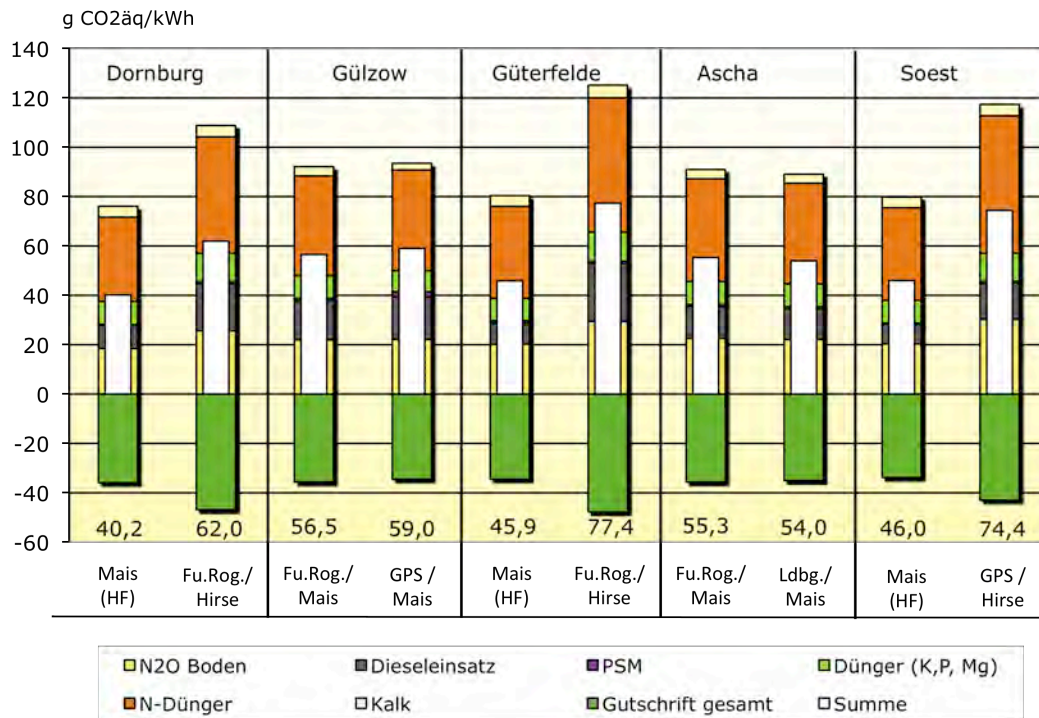


Abbildung 4-4: Rohgaserträge unterschiedlicher Substrate [FNR, 2006]

#### 4.3.1 THG-Bilanz der Anbausysteme

Im ersten Schritt sind jeweils die Substrate abgebildet, die im selben Jahr auf einem Hektar miteinander kombiniert werden. Damit ergeben sich für jeden Modellstandort in **Abbildung 4-5** zwei Balken, die einen detaillierteren Überblick erlauben. In Dornburg, Güterfelde und Soest steht jeweils Mais in Hauptfruchtstellung; das Anbausystem wird ergänzt durch Roggen bzw. Ganzpflanzensilage aus Gerste mit Hirse. In Gülzow und Ascha wird auf einem Hektar Mais mit Roggen, auf dem anderen mit Ganzpflanzensilage aus Triticale bzw. mit Landsberger Gemenge kombiniert. Die Annahme zur Rückführung und Anrechnung des Gärrestes als Ersatz von Mineraldünger entsprechen den Ausführungen in Kapitel 3. Abgebildet sind zunächst nur die Aufwendungen für die Bereitstellung der Substrate ohne die Umwandlung zu Biomethan. (Zur besseren Lesbarkeit sind die Summenzahlen nicht in den weißen Summenbalken, sondern unten in der Abbildung aufgeführt.)



**Abbildung 4-5: Resultierende THG-Bilanz der einzelnen Fruchtfolgen an den Standorten**

In allen Fällen ist der Beitrag des Stickstoff-Düngers deutlich zu erkennen, der den größten einzelnen Anteil der THG-Emissionen ausmacht. Auf den ersten Blick scheint es verwirrend, dass dieser Balken bei Fruchtfolgegliedern wie Roggen oder Hirse höher ist als bei Mais in Hauptfruchtstellung, obwohl der Bedarf an N-Dünger umgekehrt ausgewiesen wird. Mais benötigt in der Tat je Hektar Anbaufläche eine höhere Stickstoffgabe als z.B. Roggen (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Die Ergebnisse der THG-Bilanz sind auf eine Kilowattstunde Methan normiert. Werden also die hektarbezogenen Aufwendungen für Düngung und Pflanzenschutz mit den Felderträgen (Tabelle 4-2) und Rohgasausbeuten (Abbildung 4-4) auf das jeweils erzeugte Biogas umgerechnet, ergeben sich für Biomethan aus Mais niedrigere spezifische Werte als für Biogas auf Basis von z.B. Roggen. Entsprechend der dargestellten Zusammenhänge sind die Substratmischungen ohne Mais in Hinblick auf die THG-Bilanz schlechter gestellt als diejenigen, in denen Mais in Hauptfruchtstellung oder wenigstens als Zwischenfrucht inkludiert ist. Die Differenz beträgt rund 20 g CO<sub>2</sub> äq/kWh oder ca. 50 % zwischen Mais in Hauptfrucht und einer Kombination ohne Mais.

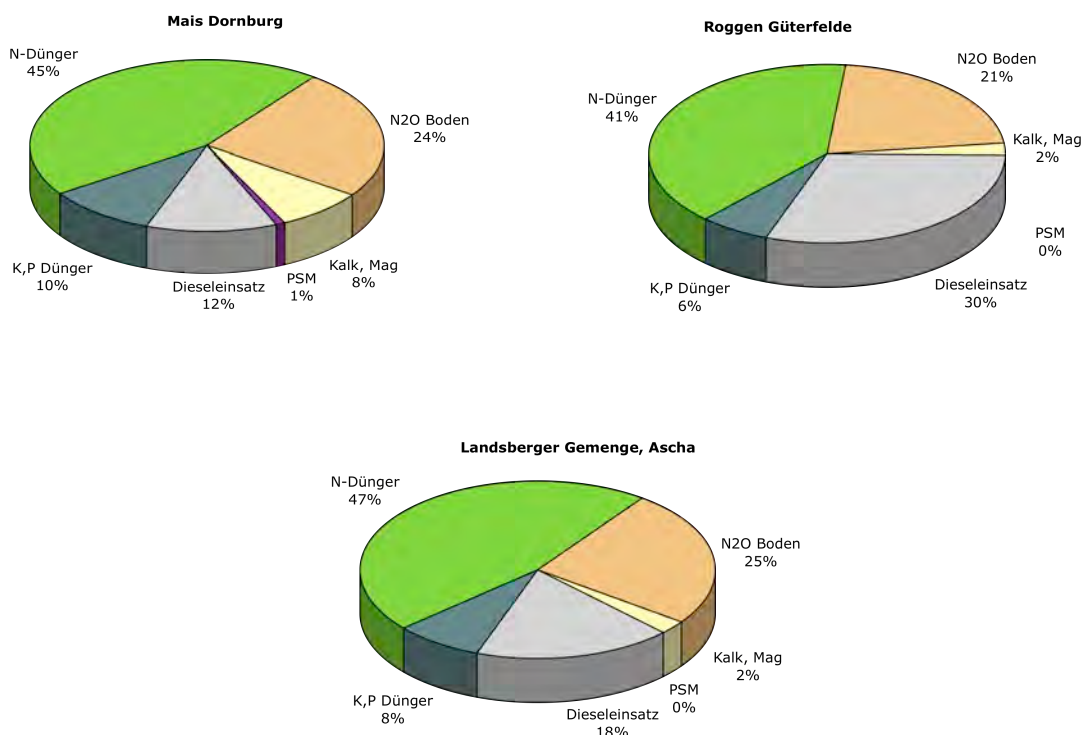
Dabei fließen natürlich die jeweils gegebenen Rahmenbedingungen an den Modellstandorten (siehe Kapitel 4.1) in die Bilanz ein. Die Unterschiede sind für Mais in Hauptfruchtstellung von relativ geringer Bedeutung; die THG-Emissionen pro kWh schwanken nur um ca. fünf bis sechs Gramm CO<sub>2</sub> äq. zwischen den Standorten Dornburg, Güterfelde und Soest. Dagegen reagiert die Kombination aus Roggen und Hirse sensibler auf eher ungünstige Rahmenbedingungen. Die



spezifischen Aufwendungen sind in Dornburg sichtbar geringer als in Güterfelde (61 g CO<sub>2</sub>äq/kWh zu 77 g CO<sub>2</sub>äq/kWh bzw. ca. 26 % mehr).

Exemplarisch sind für drei Pflanzen an den Standorten Dornburg, Güterfelde und Ascha die Aufteilungen der THG-Emissionen aus der Substratbereitstellung gezeigt (Abbildung 4-6). Dabei handelt es sich um Mais in Hauptfruchtstellung in Dornburg, also ein aus THG-Sicht recht günstiges Substrat, Roggen in Güterfelde, womit ein Gegenpol dargestellt wird, sowie die neu erprobte Option, das Ackergras Landsberger Gemeinde in Ascha.

Wiederum wird deutlich, dass der Stickstoff-Dünger den größten Anteil ausmacht, gefolgt von den N<sub>2</sub>O Emissionen, die in direkter Abhängigkeit von der Menge der Stickstoffgabe stehen. Die dritthöchsten Emissionen stammen aus dem Einsatz von Diesel in Arbeitsmaschinen, also zur Ausbringung von Saatgut, Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Ernte sowie Transport der Substrate zur Biogasanlage und Ausbringung des Gärrestes. Diese drei wichtigsten Parameter (Bereitstellung des Stickstoffdüngers, Ausgasungen von N<sub>2</sub>O aus dem Boden und Transport der Substrate und Gärrest) werden in Kapitel 5 einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.



**Abbildung 4-6:** Exemplarische Zusammensetzung der THG-Emissionen aus der Substratbereitstellung (eigene Darstellung)

### 4.3.2 THG-Bilanz der Modellstandorte

Im folgenden Schritt sind die jeweils einzelnen Fruchtfolgesysteme je Standort zusammengefasst worden. Damit wird der zuvor erwähnten Überlegung Rechnung getragen, die Biogasanlage möglichst mit einer gleichmäßigen Mischung an Substraten zu fahren, um den Prozess auch über die Jahreszeitenwechsel so konstant wie möglich zu halten (vgl. Abschnitt 4.1.3). Es sind nun auch die Emissionen, die aus der Anlagentechnik stammen, mit bilanziert worden, so dass die gesamte Prozesskette dargestellt wird. Dabei wird die Anlage mit optimierter Technik angesetzt.

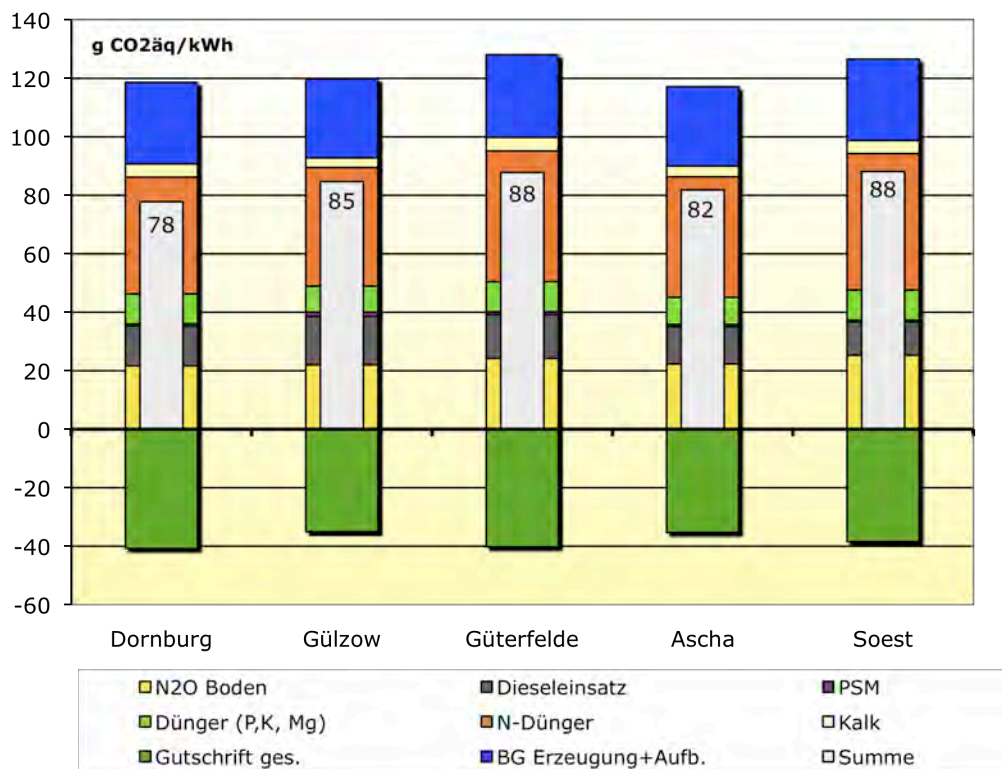


Abbildung 4-7: Resultierende THG-Bilanz der Biogaserzeugung an den Standorten

Die Unterschiede zwischen den THG Bilanzen der Substratbereitstellung fallen in der kompletten Betrachtung auf Basis der gesamten Fruchtfolge weniger ins Gewicht. Dies kommt daher, dass an jedem Standort ein Mindestanteil Mais in der gesamten Fruchtfolge enthalten ist. Die Differenzen zwischen den verschiedenen Standorten relativieren sich, wie in Abbildung 4-7 gezeigt.

Die resultierende THG-Bilanz inklusive der Biogaserzeugung, also der Emissionen aus dem Fermenter, der Aufbereitung etc., beträgt unter Berücksichtigung der positiven Effekte durch die Gärrestausbringung im günstigsten Fall (Dornburg) rund 77 g CO<sub>2</sub> äq/kWh Methan, im ungünstigsten Fall (Soest) ca. 88,2 g CO<sub>2</sub> äq/kWh Methan, dicht gefolgt von Güterfelde mit 87,8 g CO<sub>2</sub> äq/kWh Methan. Wie einleitend in Abschnitt 4.3 erläutert, sind diese Emissionsfaktoren



leicht überschätzt, da die Rohgasausbeute bei optimierter Technik noch erhöht werden kann. Zum Vergleich (siehe Kapitel 3): die Emissionen liegen bei Nutzung von Mais als einzigem Substrat mit optimierter Technik bei rund 68 g CO<sub>2</sub> äq/kWh Methan.

Damit sind auch an weniger vorteilhaften Standorten, wo aufgrund der Bodenbeschaffenheit und des Klimas keine optimalen Rahmenbedingungen für den Substratanbau gegeben sind, THG-Bilanzen für Biomethan zu erreichen, die um rund 29 % höher liegen als das Optimum.

Als einfachste Form der Ableitung einer Treibhausgasvermeidung können diese Emissionsfaktoren denen von Erdgas, mit rund 230 g CO<sub>2</sub> äq/kWh Methan [CONCAWE, 2008] gegenüberstellen. Die Minderung beträgt also 153 bzw. 142 g CO<sub>2</sub> äq/kWh Methan oder der Ausstoß rund 33 % bzw. 38 % dessen, was durch die Bereitstellung und Nutzung von Erdgas emittiert wird. Daraus ergibt sich eine THG Minderung gegenüber dem Komparator „Erdgas“ von rund 62 % bis 67 % bei Einsatz der „optimierten Technik“.

Die Ergebnisse unter Einbeziehung der Fruchtfolgen im Vergleich zu Mais in Monokultur lassen sich auf die in 3.2 dargestellte Anlage nach dem „Stand der Technik“ übertragen: für diese Anlagenkonfiguration werden dann THG Bilanzen von rund 120 g CO<sub>2</sub> äq/kWh Methan erwartet, so dass auch in diesem Fall eine Einsparung von rund 50 % gegenüber den Emissionen des Komparators Erdgas an den meisten Standorten erreicht werden kann.

Es ist somit gezeigt worden, dass es Alternativen zum ausschließlichen Einsatz von Mais gibt, die sowohl ein vergleichbares THG-Minderungspotenzial aufweisen, als auch den anderen Anforderungen an eine nachhaltige und vielfältige Landwirtschaft (Biodiversität, Humusbilanz, Erosionsschutz, etc.) gerecht werden können.

## 5 Sensitivitätsanalyse

Wie bereits eingangs gezeigt, verbessert die Ausbringung und Anrechnung des Gärrestes als Dünger die Bilanz erheblich; der annähernd geschlossene Nährstoffkreislauf ist sowohl aus Gründen der Ressourcenschonung, des Umweltschutzes und des Klimaschutzes anzuraten. Dies entspricht bereits in weiten Bereichen der gängigen Praxis.

In Hinblick auf die THG-Bilanz ist Mais das beste Substrat für die Biogaserzeugung. Aufgrund der hohen Felderträge und Rohgasausbeute fallen die hektarbezogenen Aufwendungen (Maschineneinsatz, Nährstoffbedarf) spezifisch pro Kilowattstunde Biomethan am wenigsten ins Gewicht. Dementsprechend kann sich die THG-Bilanz dann noch einmal verbessern, wenn eine höhere Rohgasausbeute erzielt werden kann. Ertragssteigerungen alleine bringen dagegen kaum einen Vorteil, da dann -bei der üblichen Berechnung des Düngebedarfs nach Entzug- auch proportional mehr gedüngt wird.

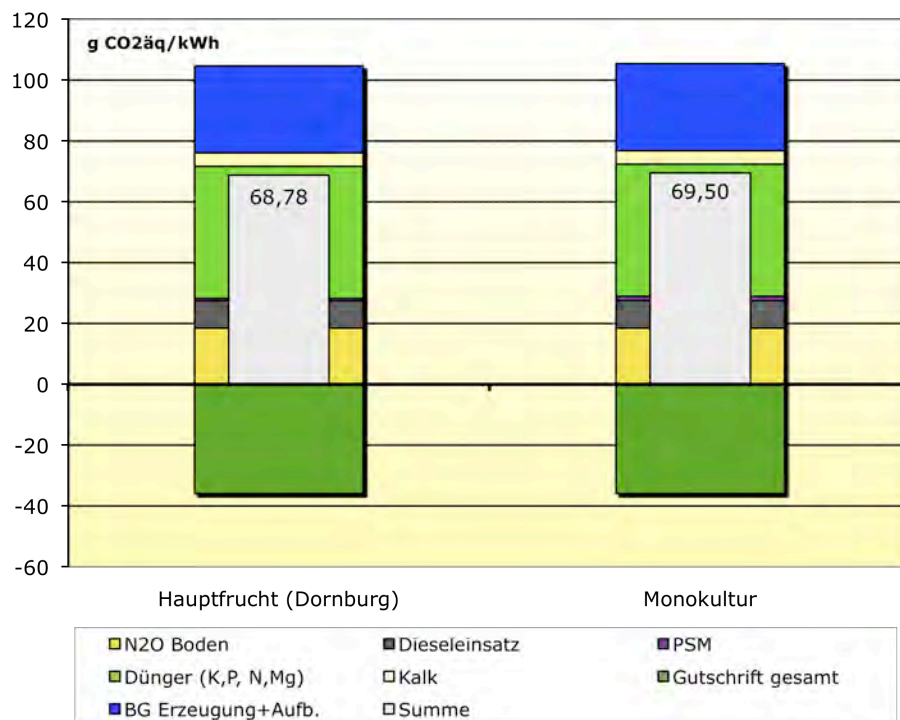
Eine Fruchtfolge mit Kombination aus Mais mit Roggen / GPS / Hirse verursacht etwas höhere THG-Emissionen als Mais in Hauptfruchtstellung; Fruchtfolgen ohne Mais sind deutlich ungünstiger. In der abschließenden Kombination und Bilanz je Standort sind die Unterschiede aber nur noch gering, da kein Anbausystem vollständig auf Mais verzichtet oder im Umkehrschluss nur darauf ausgelegt ist. Im Folgenden wird als Exkurs der Verzicht auf ein Fruchtfolgesystem bei ausschließlichem Anbau von Mais in Monokultur untersucht. Weitere Fragestellungen, die in den nächsten Abschnitten kurz vorgestellt werden, betreffen den Einfluss von Transportentfernungen, die Auswirkungen der Lachgasemissionen aus dem Acker sowie die Aufwendungen bei der Herstellung von Stickstoff-Dünger.

### 5.1 Auswirkungen des Anbaus von Mais in Monokultur

Es ist gezeigt worden, dass Mais nicht nur das derzeit gängigste, sondern auch aus Sicht der THG-Emissionen das günstigste Substrat für die Biogaserzeugung darstellt. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Notwendigkeit, THG-Bilanzen zu optimieren und den Ausstoß von Emissionen zu reduzieren, ist es daher zunächst verständlich, dass auf diese Pflanze fokussiert wird. In diesem Absatz wird daher der ausschließliche Anbau von Mais, nicht als Glied in einem Anbausystem, sondern als Monokultur betrachtet. Im Unterschied zu einer Hauptfruchtstellung, in welcher die Pflanze in einem Anbaujahr die vorrangige bis alleinige Stellung auf dem Acker einnimmt, wird unter dem Begriff Monokultur der

ausschließliche Anbau derselben Pflanze in mehreren Jahren in Folge verstanden, ohne dass eine Auflockerung durch andere Kulturen erfolgt.

Nach den Kriterien der Ökobilanz gehen in die Betrachtung die spezifischen Aufwendungen für Düngung, Pflanzenschutzmittel etc. sowie die Kenndaten für Feldertrag und Rohgasausbeute wie oben beschrieben ein. Die Gefahren durch einen Monokulturanbau liegen unter anderem im vermehrten Befall durch Schädlinge wie dem Maiszünzler sowie dem Maiswurzelbohrer. Um diesem Aspekt in der Ökobilanz Rechnung zu tragen, wurde in einer Annäherung die doppelte Menge an Pflanzenschutzmittel angesetzt. Die anderen Aufwendungen bleiben dieselben wie beim Maisanbau in Hauptfruchtstellung; laut Untersuchungen können auch bei einer mehrjährigen Monokultur gleich bleibende Erträge ohne Einbußen erzielt werden. Im Ergebnis (siehe Abbildung 5-1) ist der Unterschied zwischen Mais in Hauptfruchtstellung einer Fruchtfolge und dem Anbau in Monokultur in dieser Form der Ökobilanz kaum ein Unterschied zu erkennen.



**Abbildung 5-1: THG-Bilanz der Substratbereitstellung: Vergleich von Mais als Hauptfrucht in Fruchtfolge (Dornburg) und als Monokultur (eigene Darstellung)**

Wie aus den Ausführungen bezüglich der Humus-Bilanz verschiedener Anbausysteme zu entnehmen (vgl. Abschnitt 2.2.2 sowie 4.2.2), kann eine ausgeglichene Humus-Bilanz durch eine Monokultur Mais allerdings nicht erreicht werden: sie fällt im Gegenteil deutlich negativ aus. Aus Gründen des Umweltschutzes sowie der guten landwirtschaftlichen Praxis ist die Monokultur Mais daher strikt zu vermeiden.

Aus diesen Ausführungen folgt, dass die bloße Betrachtung der THG-Bilanz für eine umfassende Bewertung der Umwelt- und Klimaeffekte durch die Substratbereitstellung nicht ausreichend ist. Von Experten<sup>12</sup> werden die negativen Effekte auf die Humus-C Bilanz durch eine Monokultur Mais durchaus als Gefahr gesehen. Es besteht aber noch deutlich Forschungsbedarf hinsichtlich der Abbildung und damit der Wahrnehmung und letztlich Vermeidung der Effekte.

Eine mögliche Vorgehensweise würde darin bestehen, eine positive Humus-C Bilanz als THG-Senke, eine negative Bilanz im Umkehrschluss als THG-Quelle abzubilden. Dieses Vorgehen ist aber als methodisch fragwürdig zu sehen, da dieser Ansatz dann auch für andere Bereiche, etwa die Abfalldeposition, anerkannt werden müsste. Das Vorgehen wird daher bisher nicht angewandt. Auch die Option, eine weitere Wirkungskategorie „Humus-Bilanz“ in die Ökobilanz (LCA) einzuführen, wird als nicht zielführend angesehen. Da es bereits eine Vielzahl von Wirkungskategorien gibt, würde die Einführung einer weiteren nicht zur besseren Übersichtlichkeit beitragen. In der dann notwendigen Priorisierung von Wirkungskategorien wird in den letzten Jahren verstärkt auf Klimaschutzwirkungen durch THG-Vermeidung fokussiert, während andere Aspekte nur am Rande in der Diskussion vertreten sind.

## 5.2 Einfluss der Länge des Substrattransports auf die THG-Bilanz

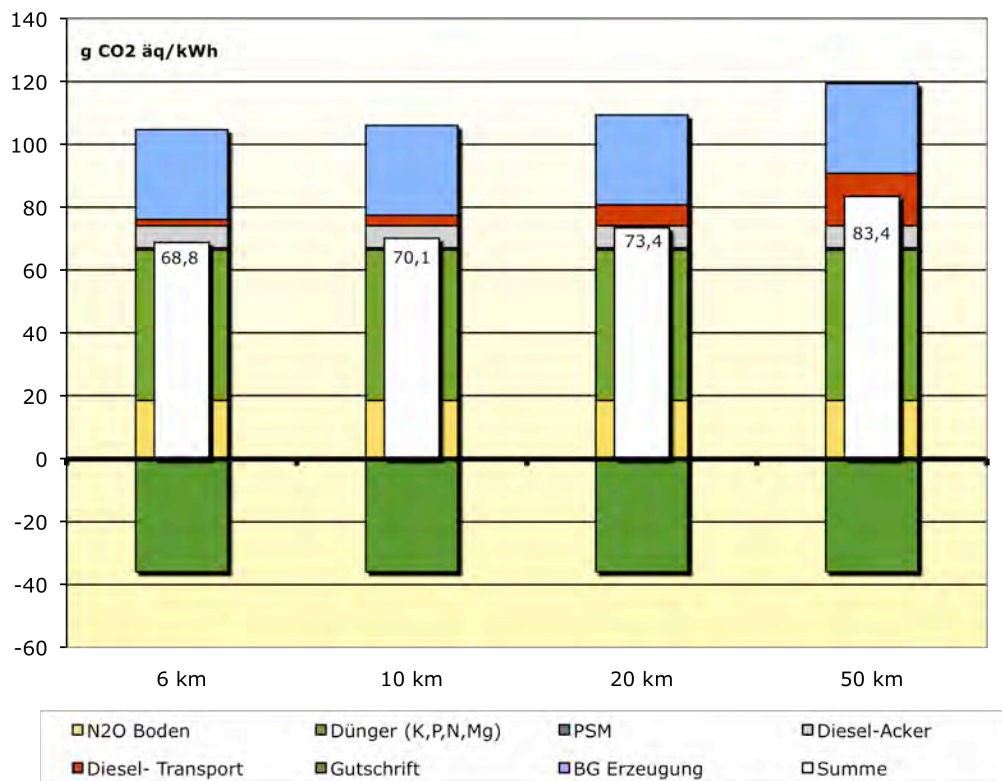
Die Zusammensetzung der THG-Emissionen aus der Substratbereitstellung (Abbildung 4-6) hat gezeigt, dass der Einsatz von Diesel in Arbeitsmaschinen - abhängig von den Standortbedingungen und den angebauten Substraten - zwischen 12 % und 30 % zur gesamten Vorkette beiträgt. In absoluten Zahlen sind das im günstigsten Fall ca. 8,5 g CO<sub>2</sub>äq/kWh für Mais, im ungünstigsten rund 41 g CO<sub>2</sub>äq/kWh für Roggen, beides am Standort in Güterfelde. Der Unterschied ist wiederum vor allem auf die unterschiedlichen Feld-, bzw. Rohgaserträge zurückzuführen, wie bereits in Abschnitt 4.3 erläutert.

Diese Aufwendungen sind auf die Gesamtheit der Feldarbeiten (Aussaat, Düngung, Pflanzenschutz, Ernte) sowie den Transport der Substrate zur Biogasanlage bezogen. Die Transportentfernung ist in den vorigen Rechnungen mit sechs Kilometern recht gering angesetzt. Die folgende Sensitivitätsanalyse zeigt auf, welche Auswirkungen eine Erhöhung der Entfernung auf die gesamte Bilanz hat. Dazu ist der Anteil der eigentlichen Transporte am gesamten Maschineneinsatz zu betrachten. Dieser beträgt im Durchschnitt über alle Standorte und Pflanzen rund ein Fünftel der gesamten Aufwendungen. Daraus resultieren – ebenfalls im Durch-

---

<sup>12</sup> Ergebnisse des Expertenworkshops des Wuppertal Instituts unter Beteiligung des DBFZ, des Ifeu Instituts, der TLL sowie der E.ON Ruhrgas AG im Januar 2009

schnitt – THG-Emissionen von rund 3,6 g CO<sub>2</sub>äq/kWh bei einer Transportentfernung von sechs Kilometern.



**Abbildung 5-2: Einfluss steigender Transportentfernung auf die THG-Bilanz am Beispiel Mais in Dornburg (eigene Darstellung)**

In der verwendeten Prozesskette werden Transportgüter linear durch das Modell geführt, ohne dass eine Umwandlung erfolgt, die nachfolgende Prozesse beeinflusst. Eine veränderte Transportentfernung wirkt sich daher ausschließlich auf die Emissionen des Transportes selbst aus. Eine Erhöhung der Transportentfernung auf die doppelte Strecke bewirkt daher ein Zunahme der Emissionen aus dem Einsatz von Diesel für Transporte auf ebenfalls das Doppelte. Entsprechend führt eine Erhöhung der angesetzten Entfernung auf zehn Kilometer zu einer durchschnittlichen THG-Emission von ca. 6 g CO<sub>2</sub>äq/kWh, eine Erhöhung auf 20 km zu ca. 12 g CO<sub>2</sub>äq/kWh. Exemplarisch ist dies wiederum am Beispiel Mais am Standort Dornburg gezeigt (Abbildung 5-2).

Bei einer Gesamtbilanz von hier 68,8 g CO<sub>2</sub>äq/kWh (Mais, Dornburg) werden durch Transporte über sechs Kilometer rund 2 g CO<sub>2</sub>äq/kWh oder drei Prozent der Gesamtemissionen verursacht. Bei einer Steigerung der Transportentfernung erhöht sich dieser Wert auf rund 3,3 g CO<sub>2</sub>äq/kWh (zehn Kilometer) bzw. ca. 6,5 g CO<sub>2</sub>äq/kWh (20 km Transportentfernung).

Im gleichen Maße nehmen die THG-Emissionen der gesamten Prozesskette zu. Auch wenn der prozentuale Anteil im letztgenannten Fall bis auf 9 % steigt, erhöht sich die THG-Bilanz um nur 6 %. Der Höhe der Transportentfernung kommt daher in der Optimierung der gesamten Prozesskette eine eher untergeordnete Bedeutung zu.

### 5.3 Einfluss der Lachgas-Emissionen auf die THG-Bilanz

In den bisher vorgestellten Ausführungen sind Lachgasemissionen in Höhe von einem Prozent des ausgebrachten Stickstoff-Düngers berücksichtigt worden, wie es den Angaben des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) entspricht. Damit werden Daten nach Tier-1<sup>13</sup> verwendet (siehe auch Abschnitt 3.2). Dieser Ansatz der proportionalen Ableitung der N<sub>2</sub>O Emissionen vom ausgebrachten N-Dünger ist zwar nach Ansicht von Experten [Edwards, 2008] nur geeignet, eine Richtung aufzuzeigen, da dieser Ansatz den jeweiligen lokalen Rahmenbedingungen wie Bodenbeschaffenheit und Wetterlage keine Rechnung trägt. Da derzeit aber für die betrachteten Systemgrenzen in Deutschland keine gemessenen Daten auf Tier-2, oder modellierte Werte auf Tier-3-Niveau vorliegen, sind, bis genauerer Daten erhoben werden, die Tier-1-Werte zu verwenden. Diese Einschätzung ist von den Anwesenden beim Expertenworkshop in Wuppertal im Januar 2009 sowie im Rahmen des fünften *International Symposium of Non-Carbon-Greenhouse-Gases* [NCGG5] im Juni/Juli 2009 in Wageningen bestätigt worden [NCGG5, 2009]. Daher sollte bis zum Vorliegen anderer Daten weiterhin der Wert von einem Prozent des ausgebrachten Stickstoffdüngers genutzt werden, wobei auf die bestehende Unsicherheit aufmerksam zu machen ist. In diesem Bereich besteht dringend weiterer Forschungs- und Messbedarf.

Indirekte Emissionen werden nach [IPCC, 2006; IPCC, 2007] nur überschlägig als zusätzliche 0,5 % abgeschätzt. Dieser Ansatz ist aber nicht geeignet, um die Emissionen über einen gesamten Lebenszyklus zu betrachten; der Fokus liegt vielmehr darauf, sie ihren Verursachern zuordnen zu können. Der Tier-1-Wert ist dabei für jede Form des ausgebrachten Stickstoff-Düngers anzuwenden, unabhängig davon, ob es sich um mineralischen Dünger oder die Verwendung von Gülle oder Gärresten handelt.

Vorläufige Tests mit Nitrifikationshemmern scheinen zu zeigen, dass die direkten Emissionen mit 1 % zumindest für Deutschland zu hoch angesetzt sind. Möglicherweise können diese Ausgasungen durch weitere Forschung und Untersuchungen auf insgesamt rund 0,5 % halbiert werden [Wulff, 2002; Leick, 2003].

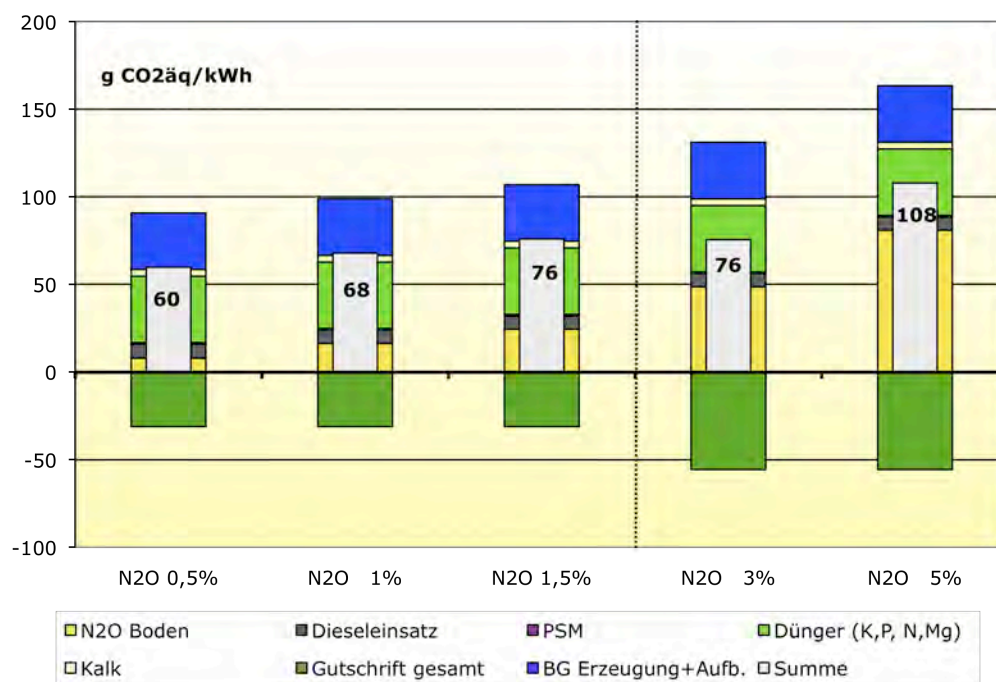
---

<sup>13</sup> Tier-1 Daten sind überschlägige Werte, die nicht gemessen (tier-2) oder modelliert (tier-3) worden sind; die Datenqualität ist demzufolge geringer.

Im Gegensatz zu diesen Ansätzen verfolgen [Crutzen et.al, 2008] einen anderen Weg, indem sie die N<sub>2</sub>O Emissionen auf "*fresh nitrogen input*", also auf die Fixierung von Stickstoff, beziehen: demnach können 3 – 5 % des fixierten Stickstoff als Lachgas in der Atmosphäre aufgefunden werden. Dieser Faktor ist über den gesamten Lebenszyklus des Stickstoffs nur einmal anzuwenden; bei der Ausbringung von Gärresten entsteht demnach kein zusätzliches Lachgas [Winiwarter, 2009].

Abbildung 5-3 zeigt den Effekt auf die THG-Bilanz bei höheren bzw. niedrigeren Annahmen für Lachgasemissionen in Abhängigkeit vom ausgebrachten Stickstoffdünger am Beispiel der Bereitstellung von Mais als Substrat an einem günstigen Standort (Dornburg). Dabei liegt dieselbe technische Prozesskette zugrunde, wie sie in Kapitel 3 eingeführt worden ist.

Da Lachgas mit einem *Global Warming Potential* (GWP) von 298 eine noch höhere Klimawirksamkeit als Methan<sup>14</sup> aufweist, erhöht sich die THG-Bilanz mit einer Steigerung von einem Prozentpunkt am ausgebrachten N-Dünger um rund 18 g CO<sub>2</sub> äq/kWh bereits recht erheblich.



**Abbildung 5-3:** Sensitivität der N<sub>2</sub>O Emissionen und Auswirkungen auf die THG-Bilanz der Substratbereitstellung am Beispiel Mais, Standort Dornburg, optimierte Technik (eigene Darstellung)

<sup>14</sup> Beim GWP-Faktor von Methan wird zwischen regenerativem Methan (GWP=25) und fossilem Methan (GWP=27) unterschieden [IPCC, 2007; Ifeu, 2008; Soukup, 2008].

Unter Berücksichtigung der indirekten Emissionen von Lachgas in Höhe von 5 % des ausgebrachten Stickstoffdüngers erhöhen sich die THG-Emissionen von Biomethan bei optimierter Anlagentechnik von rund 68 g CO<sub>2</sub>-äq/kWh Methan auf etwa 108 g CO<sub>2</sub>-äq/kWh Methan. Werden die indirekten Emissionen dagegen nicht mit bilanziert und gelingt es, die Ausgasung von Lachgas mit Nitrifiaktionshemmern auf 0,5 % des ausgebrachten Düngers zu reduzieren, verringert sich der Emissionsfaktor von Biomethan um rund 12 % auf 60 g CO<sub>2</sub>-äq/kWh Methan.

#### **5.4 Einfluss der Aufwendungen zur Bereitstellung von Stickstoff-Dünger auf die THG-Bilanz**

Die Emissionen aus der Bereitstellung des Stickstoffdüngers tragen annähernd zur Hälfte zu den gesamten Emissionen aus der Substratbereitstellung bei (Abbildung 4-6). Sie werden daher im Folgenden genauer betrachtet und auf mögliches Optimierungspotenzial hin untersucht.

Die zur Bilanzierung verwendete Prozesskette ist mit dem Software-Instrument UMBERTO<sup>®</sup> erstellt worden. Dabei sind einzelne Module, wie auch die verschiedenen Dünger mitsamt ihrer Vorketten der Datenbank EcoInvent<sup>®</sup> entnommen worden. Die Auswahl der Module erfolgt aufgrund der Vorgaben zum Anbau der Biogassubstrate, die von der TLL ermittelt wurden. Diese richten sich nach Anforderungen an den Nährstoffgehalt (Stickstoff, Kalium, Phosphat) der Düngemittel, die aufgrund gängiger Praxis mit dem Einsatz der Arbeitsmaschinen abgestimmt worden sind. Die derart ausgewählten Düngemittel sind in Tabelle 5-1 kursiv gedruckt und anderen vorhandenen Modulen gegenüber gestellt.

Im Vergleich mit den Aufwendungen für andere Mineraldünger fällt auf, dass die Vorketten sich teils deutlich voneinander unterscheiden und für die hier verwendete Bilanz nicht in jedem Fall die aus Sicht der THG-Bilanz günstigsten Module gewählt worden sind. Durch eine andere Auswahl würde sich also durchaus noch Optimierungspotenzial hinsichtlich der THG-Emissionen ergeben – der dann verwendete Dünger muss allerdings mit seiner möglicherweise unterschiedlichen Zusammensetzung und des jeweils anderen Nährstoffgehalts in die landwirtschaftliche Praxis und die bestehenden Arbeitsabläufe eingepasst werden. Dazu ist zu beachten, dass bei der Auswahl eines Düngers neben den konkreten Gegebenheiten am jeweiligen Standort vor allem die individuelle Komponente („Vorliebe“ des Landwirtes) entscheidend ist. Zudem spielen natürlich der Preis des Düngers sowie die regionale Verfügbarkeit eine wichtige Rolle.



Tabelle 5-1: Vorketten verschiedener Düngemittel (eigene Darstellung nach [Ecoln-vent Centre, 2007])

	kg CO <sub>2</sub> äq/kg
<b>N-Dünger</b>	
<i>Calciumammoniumnitrat</i>	8,57
Ammoniumnitrat	8,47
Diammoniumphosphat	2,77
<b>P-Dünger</b>	
<i>Triple-Superphosphat</i>	2,01
Diammoniumphosphat	1,55
<b>K-Dünger</b>	
<i>Kaliumchlorid</i>	0,49
Kaliumsulfat	1,41
<b>Kalk</b>	
Carbonationskalk	0,01
<i>Düngekalk</i>	0,37

Im konkreten Fall orientierte sich die Auswahl der Dünger stark an den Vorgaben der TLL für die jeweiligen Standorte. Es besteht noch Optimierungspotenzial hinsichtlich der THG-Bilanz, allerdings muss dabei die landwirtschaftliche Praxis und deren Anforderungen in diese Überlegungen mit einbezogen werden.

## **6 Ausblick: Optimierungspotenzial der Biomethanproduktion**

Die derzeit vorliegenden Rahmenbedingungen und verfügbaren Techniken zur Bereitstellung von Biomethan sind in den vorigen Kapiteln ausführlich untersucht worden. Vor dem Hintergrund der bisher sehr dynamischen Entwicklung der Biogasbranche stellt sich die Frage, in welchem Maße sich diese Entwicklung unter nachhaltigen Bedingungen (also vor allem ohne Konkurrenz zum Nahrungs- und Futtermittelanbau und ohne negative ökologische Folgen etc.) weiter fortführen lassen wird und welche Rolle Biomethan auch im Ausblick als Baustein in einem nachhaltigen Energiesystem spielen kann. Dazu ist neben der Frage, welche Potenziale absehbar zur Verfügung stehen können, auch zu untersuchen, welche Treibhausgasemissionen durch die Bereitstellung und Nutzung von Biomethan zu berücksichtigen sein werden.

Das vorliegende Diskussionspaper leistet einen Beitrag zur Einschätzung der Emissionsfaktoren und der Substratbereitstellung, während weitergehende Fragen zu Potenzialen und dem Einsatz von Biomethan im dynamischen Energiesystem im übergeordneten Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zur Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz“ im Auftrag der E.ON Ruhrgas AG bearbeitet werden.

In den folgenden Abschnitten wird dargestellt, in wie weit sich zum einen Bereitstellung von Substraten, zum anderen die Anlagentechnik im Ausblick entwickeln kann.

### **6.1 Faktor Substratbereitstellung**

In Bezug auf die Bereitstellung von Biogassubstraten sind Optimierungspotenziale durch die züchterische Bearbeitung neuer und bekannter Pflanzenarten sowie die Optimierung der Anbauverfahren zu erwarten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich die Anbaubedingungen auch in Deutschland durch den zu erwartenden Klimawandel in Zukunft ändern werden.

Beide Effekte können durchaus gegenläufige Auswirkungen zur Folge haben. Sie werden im Folgenden kurz qualitativ andiskutiert.

#### **6.1.1 Effekte durch den Klimawandel**

Aussagen bezüglich der Klima- und resultierenden Wetteränderung können nur in Form von begründeten Abschätzungen getroffen werden. Das ist insbesondere der

Fall, wenn die Aussagen regionalisiert werden sollen, um die veränderten Rahmenbedingungen an den betrachteten Modellstandorten einbeziehen zu können. An dieser Stelle soll eine qualitative Einschätzung über die Eignung der Fruchtfolgen gegeben werden, wenn die Klima- und Wetteränderungen wie abgeschätzt eintreffen. Die Grundlage für diese Abschätzung bilden die Studien [Spekat, Enke & Kreienkamp, 2007] und [Jacob et.al, 2008].

Im Vergleich scheinen die fünf Modell-Standorte in den verschiedenen Teilen Deutschlands annähernd gleichermaßen von den abgeschätzten Änderungen betroffen zu sein, wenn z.B. Aussagen über den Rückgang von Niederschlag betrachtet werden. Entscheidend für die Auswirkungen auf die betrachteten Fruchtfolgen sind daher nicht nur die erwarteten Änderungen, sondern auch die unterschiedlichen Ausgangspositionen. So wird z.B. in Soest auch unter Berücksichtigung der Minderungen im Niederschlag noch genügend Wasser zum Anbau von Mais vorhanden sein. Dagegen wird auf den heute bereits trockeneren Sandstandorten z.B. in Güterfelde unter den genannten Bedingungen kaum noch ausreichend Wasser für ein optimales Pflanzenwachstum zur Verfügung stehen. Die Alternative liegt hier im noch stärkeren Anbau von trockenstresstoleranten Pflanzen wie z.B. Roggen oder Hirse. Roggen ist bereits stark in den derzeitigen Fruchtfolgen vertreten. Es ist zu beachten, dass analog zur „Monokultur Mais“ auch eine „Monokultur Roggen“ Gefahren für die Biodiversität mit sich bringt und daher ebenfalls nicht zu befürworten ist.

Durch die höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration kann möglicherweise eine Begünstigung des Wachstums von Getreide als C3-Pflanze entstehen, da ein Düngeeffekt eintritt. Dieser Aspekt ist für weitergehende Betrachtungen zu berücksichtigen [Weigel&Manderscheid, 2005; Weigel et.al, 2006]. Es besteht weiterer Forschungsbedarf.

### **6.1.2 Effekte durch Ackerbau und Züchtungen**

Das Ziel der Pflanzenzüchtung ist es, die Anforderungen der Menschen an die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zu erfüllen. Die Pflanzenzüchtung ist dabei eng mit den allgemeinen Zielen der Pflanzenproduktion verknüpft. Mit steigender Bedeutung von Biomasse als Energieträger werden sich auch die Zuchtziele der Pflanzenzüchter ändern.

Derzeit werden Raps, Mais, Weizen, Roggen, Zuckerrüben, Gräser, Hirse, Triticale und Sonnenblumen züchterisch für die Nutzung als Energiepflanzen bearbeitet [Schörling &Beusmann 2007].

Die meisten Pflanzenzüchter verfolgen zudem auch bei der „Biomasse“ verschiedene Strategien. Dabei werden allerdings für die Verwertungslinien Biodiesel (Raps), Ethanol (Weizen, Zuckerrübe, Roggen, Triticale) unterschiedliche Zielstellungen in Bezug auf die Inhaltsstoffe und Ertragskomponenten verfolgt. Bei

der „Sommerung“ Energiemais wird versucht, das Leistungspotenzial sehr spät-reifender Sorten zu nutzen. Dabei ist allerdings die mangelnde Kältetoleranz dieser Pflanzen in unseren Klimaten problematisch. Bei Futterhirse wird neben der Kältetoleranz außerdem an der Verbesserung der Standfestigkeit sowie einer Erhöhung der Trockensubstanzgehalte gearbeitet. Bei einer anderen Züchtungsstrategie wird das Augenmerk auf leicht lösliche Kohlenhydrate gerichtet. Es wird weniger Wert auf einen hohen Stärkegehalt gelegt, da die Methanausbeute aus dem Korn und nicht lignifizierter Biomasse nahezu identisch ist.

Ein weiteres Züchtungsziel besteht darin, die Verdaulichkeit der organischen Substanz bzw. die Inhaltsstoffe mit einem hohen Methanbildungspotenzial zu erhöhen. Bei den Getreideganzpflanzen liegt der Fokus auf der Verlängerung der Kornfüllungsphase bzw. einer Verfrühung der Reifezeitpunkte, um eine frühzeitige und hohe Biomasseernte zu gewährleisten. Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt, liegt in der Erhöhung der Methanausbeute großes Potenzial insbesondere für die Optimierung der Treibhausgasbilanz von Biogas.

Nach einer von den Autoren (TLL) durchgeführten Umfrage gehen die Züchter bei Getreide- und Rapskorn in den nächsten 20 Jahren von einem praktischen Ertragsanstieg von 0,5 bis 1 % pro Jahr aus. Bei Ganzpflanzengetreide und Zuckerhirse wird erst mit der Züchtung begonnen, sodass in den nächsten 10 Jahren erhebliche Zuchtfortschritte von 2% (bis ca. 2017) zu erwarten sind. Beim Maisanbau könnte der größte Ertragsfortschritt (ca. 3% bis 2017) durch die Umstellung von stärkebetonten Typen auf vegetativ betonte Typen erfolgen. Die von den Züchtern avisierten versprochenen Maissorten der 2. und 3. Generation lassen dies als recht realistisch erscheinen. Die aufgeführten Angaben gelten allerdings nur für Standorte, bei denen die Wasserversorgung die Ausschöpfung des Ertragspotenzials ermöglicht. Probleme sind vor allem auf den trockenen Sandstandorten Ostdeutschlands zu erwarten. Mit einer drastischen Verbesserung des Evapotranspirationskoeffizienten und damit der Trockenstresstoleranz über die traditionelle Züchtung kann kurz- und mittelfristig nicht gerechnet werden. Auch über gentechnische Methoden ist eher langfristig auf diesem Gebiet ein Fortschritt zu erhoffen. Die getroffenen Aussagen gelten für die bekannten Szenarien der Klimaänderung. Zurzeit ist es sehr schwierig, eine weiter reichende (mehr als 20 Jahre) Aussage zu treffen.

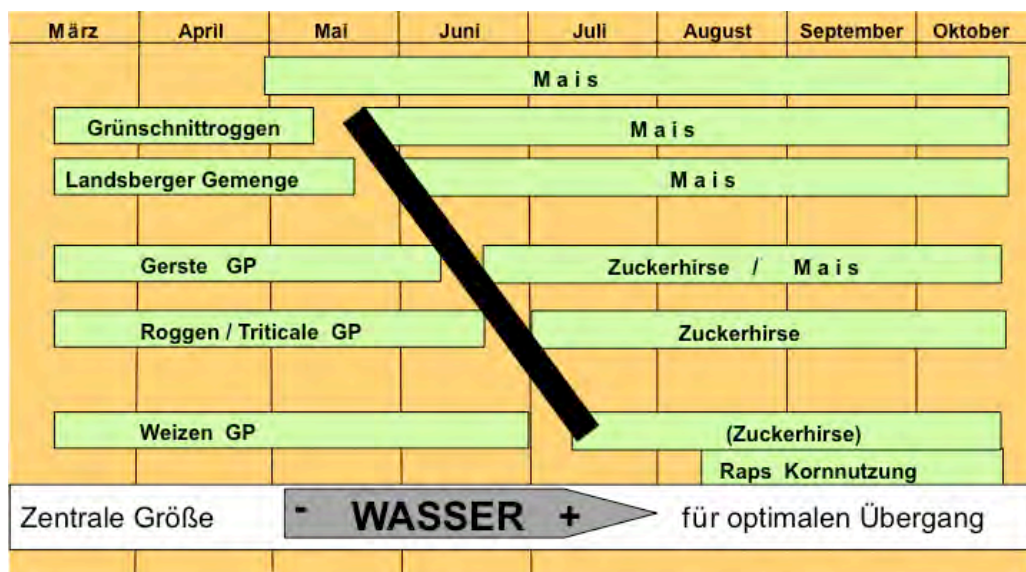
### **6.1.3 Zukünftige verfügbare Anbausysteme**

Speziell für die Erzeugung von Biogassubstraten sind neue bzw. spezialisierte Anbausysteme möglich. Allerdings befinden sich diese Systeme in unterschiedlichen Phasen der Forschung, Erprobung und Praxiseinführung. Die aussichtsreichsten Fruchtarten und Systeme werden im Folgenden kurz dargestellt.

## Zweikulturnutzungssysteme

Ein neues zukunftsfähiges Anbausystem stellt das Zweikulturnutzungssystem dar, das für den Energiepflanzenanbau konzipiert wurde. Es beinhaltet zwei Ernten pro Jahr, um einen maximalen Biomasseertrag zu realisieren. Im Frühsommer erntet man zunächst die im Vorjahr gesäte Winterfrucht, z.B. Wintergerste oder -triticale (C3-Pflanze), danach folgt eine Sommerkultur wie z. B. Mais (C4-Pflanze), die man wiederum im Herbst erntet (vgl. Abbildung 6-1). Die Ernte erfolgt jeweils vor der Vollreife der Pflanzen, da primär nicht die Frucht, sondern reine Biomasse nachgefragt wird.

Die ganzjährig bewachsene Fläche verhindert Erosion und Nährstoffauswaschung und reduziert den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Ein Problem des Anbausystems besteht darin, dass an trockenen Standorten die Erstfrucht das über Winter gespeicherte Bodenwasser ausschöpft und dann für die Zweitfrucht zu wenig Wasser zur Verfügung steht um einen ausreichenden Ertrag zu realisieren. In der Abbildung 6-1 ist zudem der Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Auswahl der Erstkultur und Zweitkultur dargestellt. Um einen optimalen Biomassezuwachs für die Zweitkultur an trockenen Standorten zu gewährleisten, ist eine frühräumende Winterzwischenfrucht, z. B. Grünschnittroggen oder Landsberger Gemenge von Vorteil.



**Abbildung 6-1:** Zwei Ernten pro Jahr: optimaler Übergang zwischen Winterung und Sommerung. Verschiedene Möglichkeiten einer Kombination [verändert nach Vetter, 2008a]

Außerdem besteht die Gefahr, dass die Silierfähigkeit der Zweitfrucht (TS-Gehalt > 28 %) nicht erreicht wird. Diese beiden Risikofaktoren des Zweikulturnutzungssystems werden züchterisch bearbeitet, so dass zukünftig angepasstere Pflanzen für den Anbau zur Verfügung stehen. Des Weiteren hat sich in den deutschen Ac-

kerbaubaugebieten die Vegetationszeit in den letzten 20 Jahren um mindestens zehn Tage verlängert, was für die Etablierung des Zweikulturnutzungssystems spricht.

### **Mischkulturanbau**

Im Projekt EVA erfolgte die Prüfung zahlreicher Varianten des Mischfruchtanbaus sowohl mit Sommerungen als auch mit Winterungen an den Standorten Straubing-Bogen und Güstrow. Zweifelsfreien Vorteilen, wie einer hohen Biodiversität, besserer Ausschöpfung des Nährstoff- und Bodenwasservorrates stehen auch Nachteile gegenüber: unterschiedliche Ansprüche an die Bestandsführung (Aussaatzeitpunkt und Aussaatmenge, Düngung, Pflanzenschutz) und oft nicht einzuhaltende optimale Erntetermine hinsichtlich Ertrag und Biogasausbeute gehören dazu. Von den zahlreichen geprüften Varianten konnte keine einzige hinsichtlich des Ertrags und des Produktionsverfahrens überzeugen. Als einzige praxiseingeführte Mischfruchtanbauvarianten sind bis auf weiteres Landsberger Gemenge und Wickroggen anzusehen.

Allerdings versprechen Versuche mit Getreidesorten und -artenmischungen Erfolg. Diese Mischungen leisten einen etwas geringfügigeren Beitrag zur Biodiversität, als die in EVA abgeprüften Mischungen, versprechen aber bei einem etwa gleich hohem Ertrag wie die Reinsaaten, eine bessere Ertragsstabilität und -sicherheit sowie einen besseren Gesundheitsstatus, insbesondere in Bezug auf Pilz-Erkrankungen, sodass mit einem reduzierten Fungizideinsatz zu rechnen ist. Das System des Anbaus von Getreidearten bzw. Getreidesortenmischungen lässt sich nach Abprüfung der jeweiligen standortspezifischen Mischungen problemlos in die für die einzelnen Regionen beschriebenen Anbausysteme integrieren.

Nach bisherigem, allerdings noch nicht abschließenden Kenntnisstand könnte auch ein reihenweiser Mischanbau von Mais-Sonnenblume (A) bzw. Mais-Zuckerhirse (B) in Zukunft erfolgreich betrieben werden. Bei beiden Mischungen ist kein Ertragsanstieg gegenüber den Reinsaaten der jeweiligen Kultur zu erwarten, auch fallen die Anbaukosten höher aus, aber die Biodiversität (A), die Ertragssicherheit (A, B) und der Erosionsschutz (B) können so verbessert werden.

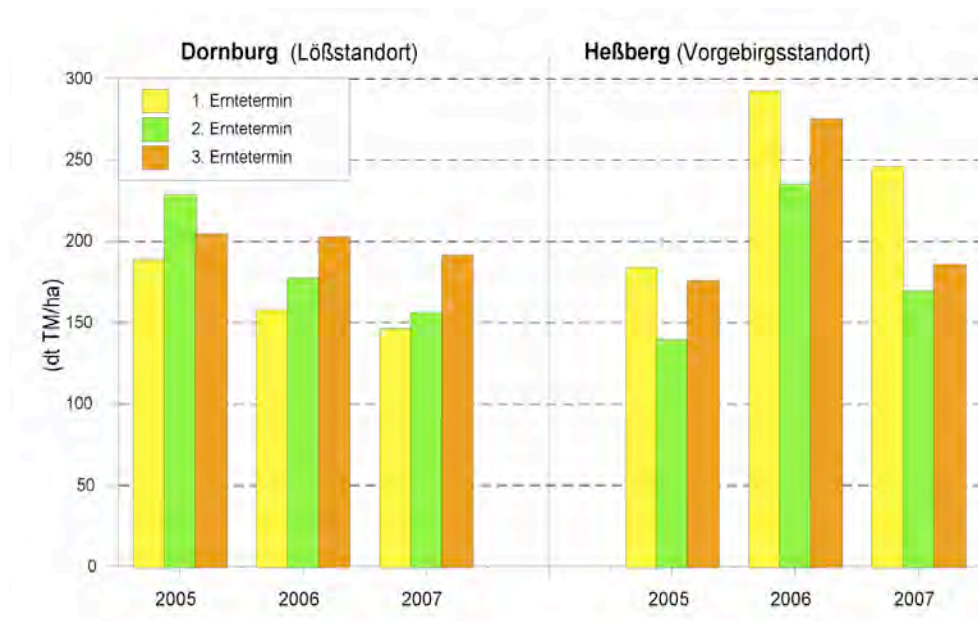
Um die in der Regel betriebswirtschaftlich betrachtet geringere Konkurrenzfähigkeit des Mischanbaus gegenüber den Reinsaaten zu verbessern, sollte eine Förderung, z. B. über Agrarumweltmaßnahmen oder Modulationsmittel geprüft werden.

### **Dauerkulturen**

Als Substrat für Biogasanlagen werden immer wieder verschiedene Dauerkulturen diskutiert. Im Vordergrund standen in letzter Zeit die Durchwachsene Silphie (Silphium perfoliatum), Sida (Sida hermaphrodita), eine Kreuzung zwischen

Ampfer und Spinat = RUMEX OK2, Topinambur (*Helianthus tuberosus*) oder Staudenknötericharten (*Polygonum sachalinense*, *Polygonum japonica*, *Polygonum weyrichi*). Für die Durchwachsene Silphie wird eine Nutzungszeit von bis zu 15 Jahren angestrebt. Für die Versorgung von Biogasanlagen, vor allem wenn sie im Besitz von Landwirten sind bzw. die Substratabnahme über langjährige Verträge gesichert ist, können Dauerkulturen durchaus sinnvoll sein, da beide über ähnlich lange Abschreibungszeiträume betrieben werden.

Die seit drei Jahren mit der Durchwachsenen Silphie an zwei Standorten durchgeführten Versuche brachten Erträge zwischen 18 und 28 t TM pro Jahr ab dem 2. Standjahr (vgl. Abbildung 6-2). Im Anpflanzjahr wird eine Rosette gebildet, erst ab dem 2. Standjahr schosst dann die Pflanze. Die aufgeführten Erträge in Abbildung 6-2 liegen etwas über den standort-typischen Maiserträgen. Auch die Methanausbeuten sind mit Mais vergleichbar. Zurzeit werden weitere Herkünfte an verschiedenen Standorten Deutschlands sowie im Praxisanbau getestet. Sollten sich die Ergebnisse in den nächsten Jahren bestätigen, würde neben Mais, den Hirsen und Ganzpflanzengetreide eine weitere interessante Kulturart für Biogasanlagen zur Verfügung stehen.



**Abbildung 6-2: Trockenmasseerträge der Durchwachsenen Silphie in Abhängigkeit vom Erntetermin**

Bedeutend skeptischer sind Sida und Rumex einzuschätzen. Bei beiden Pflanzenarten werden sehr hohe Erträge und eine gute Eignung für die Biogasanlagen angegeben. Untersuchungen zur Sida wurden bisher vor allem in Polen [Borkowska, et.al. 2003] und zu Rumex in Tschechien durchgeführt. Beide Arten sind ebenfalls ausdauernd. Im Gegensatz zur Durchwachsenen Silphie sollen diese Pflanzen im Herbst abtrocknen, so dass sie alternativ auch zur thermischen Verwertung ge-

nutzt werden könnten. Topinambur liefert als Kraut sehr hohe Trockenmasseerträge, allerdings bezogen auf die organische Trockenmasse mit geringen Methan- ausbeuten, so dass vorerst von einem Anbau abzusehen ist.

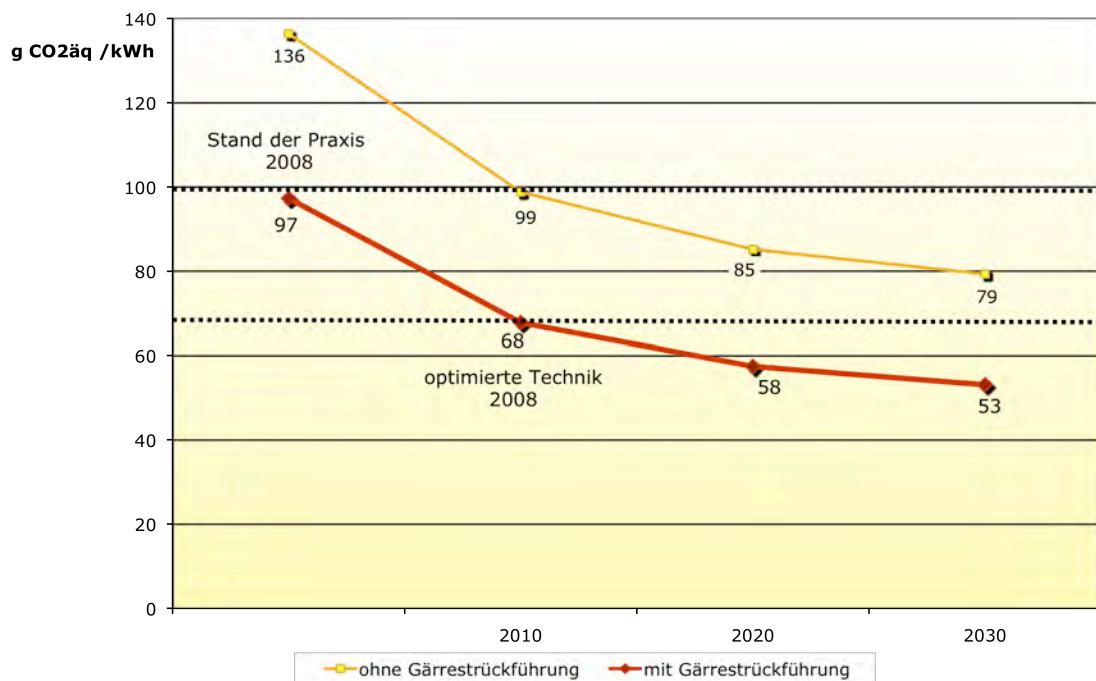
## 6.2 Faktor Anlagenbau

Eine Dynamisierung der Anlagentechnik kann aus heutiger Sicht nur als vereinfachte Abschätzung bzw. grobe Tendenz erfolgen, da das erzielbare Maß an technischem Fortschritt nur schwer über einen Zeitraum von mehreren Dekaden absehbar ist. Um dennoch zu einer Abschätzung des Optimierungspotenzials zu gelangen, werden die beiden untersuchten Anlagentypen „Stand der Technik 2008“ und „Optimierte Technik“ aus Kapitel 3 als Eckpfeiler angesetzt. Als Substrat ist wieder nur Mais angesetzt. Aus der Diskussion der technischen Parameter für den Fall mit optimierter Technik ist zuvor abgeleitet worden, dass die großen Emissionsminderungs- bzw. Optimierungspotenziale im Prozess der Biogaserzeugung damit bereits weitgehend abgearbeitet sind. So sind z.B. die wesentlichen Methanquellen identifiziert und werden bei Anlagen nach „Optimierte Technik“ so weit wie derzeit möglich reduziert.

Ein Optimierungspotenzial liegt daher hauptsächlich noch im übergreifenden Prozessmanagement. So könnte z.B. die Abwärme der thermischen Nachbehandlung im Zuge der Aufbereitung zur Beheizung des Fermenters zurückgeführt werden. Eine Steigerung der Rohgasausbeute kann Auswirkungen auf die Fermenterbelastung und damit auf den Energiebedarf des Rührwerks nach sich ziehen. In wie weit das optimierte Zusammenspiel dieser einzelnen Komponenten sich auf die Effektivität der gesamten Anlage und damit auf die THG-Bilanz niederschlägt, kann aber derzeit nicht im Detail vorausgesehen werden. Das mögliche Optimierungspotenzial wird daher als Fortschreibung der Verbesserung vom Anlagentyp „Stand der Technik“ zu „Optimierte Technik“ abgeschätzt. Als Substrat wird wiederum exemplarisch Mais eingesetzt.

Die Differenz in der THG-Bilanz bei Berechnung der beiden Anlagenkonfigurationen beträgt mit Rückführung des Gärrests (zugrunde liegende Annahmen wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert) ca. 29 g CO<sub>2</sub>äq/kWh oder ca. 30 %. Wie eingangs beschrieben (vgl. Kapitel 3.2), ist in dieser Differenz auch eine gewisse Unsicherheit in der Datenlage enthalten, etwa in Bezug auf die Methanverluste in der Biogasanlage, was die Differenz möglicherweise vergrößert.





**Abbildung 6-3: THG-Emissionsfaktoren für Biomethan zur Einspeisung aus den betrachteten Anlagen und Fortschreibung bis 2030 (eigene Darstellung)**

Es wird davon ausgegangen, dass ein ebenso großer Fortschritt bei der Entwicklung der nächsten Generation nicht wieder gelingt. Als grobe Abschätzung wird daher angenommen, dass die nächste Generation eine Optimierung um die Hälfte des zuvor erreichten Fortschritts erzielt. Gleiches gilt wiederum für die Dekade von 2020 - 2030. Daraus kann für den mittelfristigen Ausblick eine THG-Bilanz der großmaßstäblichen und industriellen Biomethanherzeugung von rund 53 g CO<sub>2</sub>äq/kWh abgeschätzt werden.

Entsprechend der Zielsetzungen der Gasnetzzugangsverordnung soll die Einspeisung von Biomethan in Deutschland bis 2020 auf 6 Mrd. m<sup>3</sup> und bis 2030 auf 10 Mrd. m<sup>3</sup> ansteigen [BMWI 2006]. Wenn diese Mengen an Biomethan zukünftig zur Verfügung stehen sollen, wird ein erheblicher Zubau an großmaßstäblichen Biogasanlagen notwendig. Unter dieser Voraussetzung kann angenommen werden, dass zum einen der oben abgeschätzte Fortschritt in der integrierten Anlagentechnik auch erzielt wird. Zum anderen können die ermittelten Werte als Annäherung an einen Mittelwert der Prozesskette „Biomethan zur Einspeisung“ angesehen werden, da die vergleichsweise wenigen Anlagen, die heute mit weniger optimierter Technik betrieben werden („Stand der Technik 2008“) dann in der Gesamtbetrachtung kaum ins Gewicht fallen.

## 7 Fazit

Das vorliegende Diskussionspapier leistet einen Beitrag zur Bewertung der Bereitstellung von Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz in Hinblick auf die Treibhausgasbilanz der Prozesskette sowie die Umwelteffekte durch den Anbau der Substrate. Im Fokus der Arbeiten stehen Anlagen, die großmaßstäblich und industriell betrieben werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind damit nicht in jedem Fall auf kleinere und ältere Biogasanlagen übertragbar.

### Zusammenfassung

Biogas kann aus Fermentation verschiedener feuchter Biomasse erzeugt werden. Nach der Aufbereitung (im Wesentlichen bestehend aus Entschwefelung, Trocknung und CO<sub>2</sub>-Abtrennung) spricht man von Biomethan, das als vollständiges Erdgas-Substitut ins Erdgasnetz eingespeist und ebenso wie dieser Energieträger genutzt werden kann.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten sind für fünf Standorte in Deutschland **regional angepasste Fruchtfolgen** untersucht worden, in denen neben gängigen Marktfrüchten auch Biogassubstrate angebaut werden und die einen möglichst großen Teil der deutschen Landwirtschaft abbilden. Aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen bezüglich Bodengüte, Niederschlag, Tierbesatz, Sonderkulturen etc. sind folgende Referenzstandorte ausgewählt worden: Haus Düsse (Landkreis Soest), Ascha (Landkreis Straubing-Bogen), Gülzow (Landkreis Güstrow), Dornburg (Saale-Holzland-Kreis) und Güterfelde (Landkreis Potsdam-Mittelmark).

An diesen Standorten sind wesentliche Umwelteffekte wie Auswirkungen auf die Humusbilanz, die Bodenbedeckung (Erosionsschutz) sowie die Biodiversität betrachtet worden. Es lässt sich festhalten, dass durch die Erzeugung von Biogassubstraten nach guter landwirtschaftlicher Praxis keine negativen Umweltwirkungen zu erwarten sind: die Anforderungen an die konventionelle Landwirtschaft zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion werden erfüllt. Die Ausweitung der Anbaufläche für Mais im Rahmen einer angepassten Fruchtfolge kann in bestimmten Gebieten mit hoher Getreidefläche sogar zu einer vielfältigeren Landwirtschaft führen und so zur Diversifizierung beitragen. Das gleiche gilt ebenfalls und sogar in stärkerem Maße, wenn nicht nur Mais angebaut, sondern eine ausgewogene Fruchtfolge angelegt wird. Als Substrate sind dafür hier neben Mais vor allem Futterroggen und Futterhirse, Ganzpflanzensilage aus Wintergerste und Wintertriticale, ein Gemisch aus Mais und Sonnenblumen sowie das Ackergras Landsberger Gemenge untersucht worden.

Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Biomethanbereitstellung wird zwischen **zwei Anlagentypen** unterschieden: (1) einer großmaßstäblich geführten Anlage nach heutigem „**Stand der Technik**“, die eine durchschnittlich effektive Biogasanlage im Jahr 2008 im industriellen Maßstab abbildet und (2) einer Anlage, die als „**Optimierte Technik**“ das aus heutiger Sicht und für die nahe Zukunft denkbare Optimierungspotenzial so weit wie möglich ausschöpft. Bei dieser Letztgenannten handelt es sich um einen Anlagentyp, der bereits stellvertretend für die nächste Generation von Biogasanlagen steht.

Die Unterschiede zwischen den beiden beschriebenen Anlagenkonfigurationen liegen im Wesentlichen in einer verbesserten Rohgasausbeute ( $220 \text{ m}^3/\text{tFM}$  (Mais) für die optimierte Technik gegenüber  $200 \text{ m}^3/\text{tFM}$  (Mais) für den heutigen Stand der Technik), geringeren Verlusten bei der Silierung der Substrate (5 Massen-% statt 10 Massen-%), um die Hälfte reduzierten diffusen Methanemissionen aus dem Fermenter sowie einem besseren Stickstoffhandling beim Ausbringen des Gärrestes. Diese Differenzen resultieren in einer Reduktion der THG-Emissionen von  $97 \text{ g CO}_2\text{äq/kWh}$  für den Stand der Technik auf  $67 \text{ g CO}_2\text{äq/kWh}$  für die optimierte Technik. Beide Werte gelten zunächst nur für den Einsatz von Mais als günstigstem Substrat. Bei einer Anpassung an die regional vorliegenden Fruchtfolgen und die hieraus resultierenden Substratmische ergibt sich ein **leichter Anstieg der Emissionsfaktoren** um rund 10 bis  $20 \text{ g CO}_2\text{äq/kWh}$  Methan. Die THG-Emissionen von Biomethan betragen somit rund ein Drittel der Emissionen von Erdgas mit  $230 \text{ g CO}_2\text{äq/kWh}$  Methan.

Diese Daten gelten für den Fall, dass der **Gärrest als Nebenprodukt der Biomethanproduktion** berücksichtigt und anstelle von Mineraldüngern wieder auf den Feldern ausgebracht wird. Dadurch können rund 60 % des mineralischen Stickstoffdüngers sowie 100 % des Phosphat- und Kaliumdüngers eingespart werden und die Emissionsbilanz verbessert sich um rund ein Drittel. Dieses Vorgehen entspricht der gängigen Praxis, da sowohl der Landwirt durch verminderte finanzielle Aufwendung zum Kauf von Mineraldünger, als auch der Anlagenbetreiber davon profitieren, der den Gärrest andernfalls entsorgen müsste.

Im **mittelfristigen Ausblick bis 2030** kann über die Betrachtung des bereits erzielten Fortschritts in der Anlagenkonfiguration („Optimierte Technik“) eine THG-Bilanz der großmaßstäblichen und industriellen Biomethanerzeugung von rund  $53 \text{ g CO}_2\text{äq/kWh}$  abgeschätzt werden. Das Optimierungspotenzial der Anlagentechnik liegt dabei hauptsächlich noch im übergreifenden Prozessmanagement.

## Schlussfolgerungen

In der gängigen Literatur ist in Prozessketten- und Ökobilanzen vielfach vor allem mit Mais als gängigstem Substrat und hier oft mit „Standard-“ oder Durchschnittswerten gerechnet worden. Oft fehlt ein **konkreter Bezug zu realen Be-**

**dingungen**, die an konkreten Standorten vorgefunden werden. Die bloße Konzentration auf Mais als einzigem Substrat ist aber nicht zielführend, da ein Anbau von Monokulturen ohne Einhaltung einer Fruchtfolge nach guter landwirtschaftlicher Praxis eigene Schwierigkeiten mit sich bringt: neben dem Verlust an Biodiversität und Artenreichtum sind vor allem die vermehrte Anfälligkeit für Schädlinge sowie der Abbau von Humus zu nennen.

Für den **Landwirt** spielen neben den Erträgen und Kosten, die sich letztendlich im Gewinn widerspiegeln, **weitere Faktoren** eine nicht zu unterschätzende Rolle. Dazu zählen die Entzerrung der Arbeitsspitzen zur Aussaat, Pflege und Ernte, um unter anderem die Technik inkl. den Siloraum besser auszulasten. Des Weiteren ist mit einer weiteren Ausbreitung des als Quarantäneschädling eingestuften Maiswurzelbohrers zu rechnen. Diese Gefahr besteht vor allem bei einer Monokultur. Artenreiche Fruchtfolgen sichern dagegen auch in Jahren mit extremen Witterungsbedingungen die Substratbereitstellung für die Biogasanlagen besser ab, als die Konzentration auf eine Fruchtart. Der Betreiber der Biogasanlage und der Erzeuger von Substraten sollte aus den aufgeführten Gründen auf mindestens drei bis vier Pflanzenarten setzen, die natürlich standortbedingt erheblich abweichen können.

In Bezug auf die Bereitstellung von Biogassubstraten sind **Optimierungspotenziale** durch die **züchterische Bearbeitung** neuer und bekannter Pflanzenarten sowie die Optimierung der Anbauverfahren zu erwarten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich die Anbaubedingungen auch in Deutschland durch den zu erwartenden Klimawandel in Zukunft ändern werden. Beide Effekte können durchaus gegenläufige Auswirkungen zur Folge haben, die derzeit nicht quantifizierbar sind.

Bei **Nutzung moderner Anlagentechnik** tragen die Aufwendungen zur Bereitstellung der Biogassubstrate mit rund 50 % den größten Anteil zu den gesamten Treibhausgasemissionen der Prozesskette bei. Bemühungen zur weiteren Optimierung der THG-Bilanz erfordern daher eine genaue Untersuchung dieses Prozessabschnitts. Weiteres Optimierungspotenzial besteht etwa in der Steigerung der Rohgasausbeuten (gegebenenfalls durch Nutzung neuartiger Pflanzen) sowie im übergreifenden Prozessmanagement und der noch effizienteren Verbindung einzelner Anlagenteile (z.B. Abwärmenutzung, etc.).

Die **Lachgasemissionen**, die durch Nutzung und Ausbringung von Stickstoffdünger entstehen, können einen relevanten Einfluss auf die gesamte Treibhausgasbilanz haben. Es ist zunächst mit dem allgemeinen Tier-1 Wert (für direkte Emissionen laut IPCC) von einem Prozent des ausgebrachten Stickstoff-Düngers gerechnet worden. Werden neben diesen direkten auch noch indirekte Emissionen von  $N_2O$  berücksichtigt, erhöht sich der Wert auf rund 3–5 %. Die Gesamtbilanz würde sich dann von rund 67 g  $CO_2\text{äq/kWh}$  Methan auf etwa 143 g  $CO_2\text{äq/kWh}$

verdoppeln. Es besteht weiterer Forschungs- und Messbedarf, um zum einen für Deutschland und die betrachteten Regionen genauere Werte für die direkten Lachgasemissionen zu ermitteln. Zudem besteht in der Fachöffentlichkeit noch keine Einigung darüber, ob und in welcher Höhe indirekte N<sub>2</sub>O-Emissionen angerechnet werden sollten.

Die **Emissionsfaktoren auf Basis einer Fruchtfolge** nach guter landwirtschaftlicher Praxis liegen je nach Standort nur um rund 10 bis 20 g CO<sub>2</sub>-äq/kWh Methan über denen für Mais als alleinigem Substrat. Sie betragen unter Berücksichtigung der positiven Effekte durch die Gärrestausrückführung im günstigsten Fall (Dornburg) rund 77 g CO<sub>2</sub>-äq/kWh Methan, im ungünstigsten Fall (Soest) werden ca. 88 g CO<sub>2</sub>-äq/kWh Methan emittiert.

An fünf Modellstandorten in verschiedenen Regionen Deutschlands ist im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten gezeigt worden, dass durch die Anwendung einer mehrgliedrigen Fruchtfolge Substrate für Biogasanlagen zur Verfügung gestellt werden können, die eine durchaus zufrieden stellende THG-Bilanz aufweisen – auch an weniger vorteilhaften Standorten, wo aufgrund der Bodenbeschaffenheit und des Klimas keine optimalen Rahmenbedingungen für den Substratanbau gegeben sind.

Zur **umfassenden Bewertung und Optimierung** der Rolle von Biomethan als Baustein im zukünftigen Energiesystem muss geprüft werden, welche Mengen an Ackerfläche und damit an Substrat in Deutschland zur Verfügung stehen können, ohne in Konkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zu treten. Darüber hinaus ist zu klären, durch welche Anwendung in welchem der Bereiche der Strom-, Wärme- oder Kraftstoffbereitstellung der höchste Beitrag zum Klimaschutz durch Vermeidung von Treibhausgasen geleistet werden kann. Ein wichtiger Aspekt zur Einschätzung der ökologischen Wirkungen liegt mit dem vorgestellten Diskussionspapier aber bereits vor.

## 8 Literaturverzeichnis

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LFL (2007): Klimabilanz für Biogasstrom. Klimabilanz der energetischen Nutzung von Biogas aus Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen. Freisingen.
- BMWi (2006): BGBl. I S 2477; <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/entwurf-verordnung-biogas,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf> (24.02.2009)
- Borkowska H. und K. Wardzinska (2003): Some effects of *Sida hermaphrodita* R.cultivation on sewage sludge. Polish Journal of Enviroment St. Seite 119-122
- P.J. Crutzen, A.R. Mosier, K.A. Smith, W. Winiwarter (2008): N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Max Planck Institute for Chemistry, Department of Atmospheric Chemistry Mainz, Germany, Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, Mount Pleasant, SC, USA, School of Geosciences, University of Edinburgh, Edinburgh, UK, Austrian Research Centers - ARC, Vienna, Austria. Atmos. Chem. Phys., 8, 389–395, 2008
- DMK, Deutsches Maiskomitee (2007): Karte zur Rindviehdichte auf Kreisebene von 2003. [http://www.maiskomitee.de/dmk\\_download/fb\\_fakten/dateien\\_pdf/Karte\\_Rindviehdichte\\_Kreise.pdf](http://www.maiskomitee.de/dmk_download/fb_fakten/dateien_pdf/Karte_Rindviehdichte_Kreise.pdf)
- Deutsches Biomasse Forschungszentrum (2009 a): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse.
- Deutsches Biomasse Forschungszentrum (2009 b): Ökonomische und ökologische Bewertung von Erdgassubstituten aus nachwachsenden Rohstoffen.
- Ecoinvent Centre (2007): Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems: ecoinvent report No. 15a. Zürich, Dübendorf.
- Robert Edwards, Joint Research Centre, European Commission, Institute for Energy - Renewable Energies Unit: persönliche Mitteilung. Oktober 2008
- Empa (2007): Ökobilanz von Bioenergieprodukten. Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen
- EnviTec (2007): Pressemitteilung bei der 6. Biogasfachtagung der EnviTec Biogas AG. Lohne/Saerbeck
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2005): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Technologie und Biosystemtechnik. Gülzow.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2006): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2008): Biogasbasisdaten Deutschland. Gülzow

- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2009): Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung – Stand und F+E-Bedarf. Gülzower Fachgespräch Band 30. Gülzow
- Fachverband Biogas e.V (2007): Biogas im Jahr 2020: Wo werden wir stehen? Vortrag bei der 16. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas. Leipzig.
- Fraunhofer UMSICHT (2008): Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008. Oberhausen.
- Gebel, D. und G. Klingenhagen (2006): Wie viel Pflanzenschutz brauchen Energiepflanzen?; Bayer Crop Science Kurier von 03/08, S. 26 -29
- Glemnitz, M. (2008): Ökologische Bewertung. Auswertung auf Arten- und Individuenzahl. In: Vetter et al. (2008): Standortangepasste Anbausysteme. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.). Gülzow.
- Grunert, Michael (2008): Die Fehler bei der Umweltbilanzierung von Bioenergie: Für eine Versachlichung der Diskussion um nachwachsende Rohstoffe. In Solarzeitalter, Nr. 2, 71–80.
- Gutser, R. (2008): Nährstoff- und Humuswirkungen bestimmen die Vorzüglichkeit organischer Dünger. Vortrag bei 5. Pflanzenbautagung vom 25.01.2008, TU München.
- Institut für Energetik und Umwelt (2006): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse; Band 2: Biomassepotenziale in Deutschland, Nutzungstechniken und ökonomisch-ökologische Bewertung ausgewählter Nutzungspfade. Leipzig.
- Institut für Energetik und Umwelt (2007a): Definition der Modellanlagen. Leipzig.
- Institut für Energetik und Umwelt (2007b): Kurzstudie: Beurteilung von Biogasanlagenparks im Vergleich zu Hof-Einzelanlagen. <http://oeko.de/oekodoc/317/2007-007-de.pdf>
- Institut für Energetik und Umwelt (2007c): Schlüsseldaten Klimagasemissionen: Welchen Beitrag kann die Biomasse zum Klimaschutz leisten? [www.ufop.de/downloads/Bericht\\_Klimagas.pdf](http://www.ufop.de/downloads/Bericht_Klimagas.pdf)
- Institut für Energie- und Umweltforschung (2007): Biomasse und Effizienz: Vorschläge zur Erhöhung der Energieeffizienz von §8 und §7-Anlagen im Erneuerbare-Energien-Gesetz. [www.ifeu.de/energie/pdf/ifeu\\_biomasse\\_effizienz.pdf](http://www.ifeu.de/energie/pdf/ifeu_biomasse_effizienz.pdf)
- Institut für Energie- und Umweltforschung (2008): Basisdaten zu THG-Bilanzen für Biogas-Prozessketten und Erstellung neuer THG-Bilanzen. Im Auftrag der E.ON Ruhrgas AG. Heidelberg.
- Institut für Energetik und Umwelt Leipzig, Thüringische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fichtner GmbH; S. Klinski (2007): Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Im Auftrag des BMU. Leipzig, Stuttgart, Jena, Berlin.
- IPCC (1995): IPCC/Second Assessment. Report (SAR). "Climate Change 1995". Cambridge University Press, UK
- IPCC (2001): IPCC Third Assessment Report (TAR) "Climate Change 2001". Cambridge University Press, UK
- IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies, Japan

- IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report: „Climate Change 2007“. Cambridge University Press, UK
- Jacob, Dr. Daniela, Holger Göttel, Dr. Sven Kotlarski, Philip Lorenz, Kevin Sieck (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland; Max-Planck-Institut für Meteorologie
- Körschens, Martin (2004): Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. VDLUFA Standpunkt, Bonn
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2007): Faustzahlen Biogas. Darmstadt.
- Landesumweltamt Brandenburg (2008): Überwachung von Biogasanlagen. Vortrag bei Fachtagung Biogas. Brandenburg.
- Leick, B.C.E (2003): Emission von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen. Dissertation an der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim, 2003.
- Helmut Loibl (2009): Rechtsfragen bei der Raumplanung und der Genehmigung von Biogasanlagen. Vortrag beim Workshop Rechtsfragen der Einspeisung von Biogas in die Erdgasnetze. Oberhausen, Juni 2009
- Fifth International Symposium on Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases (NCGG-5): Science, Reduction Policy and Implementation. Wageningen, The Netherlands; June 30 - July 3, 2009. [www.ncgg5.org](http://www.ncgg5.org)
- Roßberg, D., W. Michel, R. Graf, R. Neukampf (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland; in: Nachrichtblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst Nr. 59, S. 155-161; Stuttgart
- Schörling, Markus, S. Stirn, v. Beusmann (2007): Können moderne Verfahren der Pflanzenproduktion das Angebotsproblem lösen? Chancen und Risiken von Biotechnologie und Gentechnik?; Forschungsschwerpunkt Biotechnik, Gesellschaft und Umwelt (FSP BIOGUM); Universität Hamburg.  
[http://213.133.109.5/video/energy1tv/Jan%20NEU/Konferenz/Wirtschaft/BioEnergie\\_g\\_R/PDF/Forum3-Beusmann.pdf](http://213.133.109.5/video/energy1tv/Jan%20NEU/Konferenz/Wirtschaft/BioEnergie_g_R/PDF/Forum3-Beusmann.pdf)
- Statistisches Bundesamt Deutschland destatis (a) (2008): Anbauverhältnisse 2007; persönliche Auskunft
- Statistisches Bundesamt (2008): Fachserie 3 Reihe 3.2.1 Land- und Forstwirtschaft, Fischerei August September 2008
- Statistisches Bundesamt Deutschland destatis (b) (2008): Erntemengen 1999-2007, persönliche Auskunft
- Soukup, Ole (2008): Erstellung von Produktökobilanzen auf Basis von Stoffstromnetzen für die Bereitstellung von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz. Diplomarbeit. Wuppertal.
- Spekat, Arne, Wolfgang Enke und Frank Kreienkamp (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2“. Climate & Environment Consulting



- Thüringer Landesamt für Statistik [TLS](2007): Statistischer Bericht. Ernte- und Betriebsberichterstattung Feldfrüchte und Grünland in Thüringen 2007. Verfügbar unter: [www.statistik.thueringen.de](http://www.statistik.thueringen.de)
- Warnecke, S., M. Overesch, H.-J. Brauckmann, G. Broll, H. Höper: Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus und der Düngung mit Gärresten auf den Kohlenstoffgehalt im Boden – erste Modellierungsergebnisse; Tagungsbeitrag Bodenbiologische Indikatoren für eine nachhaltige Bodennutzung; <http://www.dbges.de>
- Weigel, H.J., Manderscheid, R. (2005): CO<sub>2</sub> Enrichment Effects on Forage and Grain Nitrogen Content of Pasture and Cereal Plants. Journal of Crop Improvement (Food Products Press, an imprint of The Haworth Press, Inc.) Vol. 13, No. 1/2 (25/26), 2005, pp. 73-89
- Weigel, H.-J.; Pacholski, A.; Waloszczyk, K.; Frühauf, C. (2006): Zur Wirkung erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen in einer Fruchtfolge: Beispiele aus dem Braunschweiger Kohlenstoffprojekt;. In: Landbauforschung Völkenrode 56 (2006) 3-4: S. 101-115; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Braunschweig
- Winiwarter, W., IIASA (2009): persönliche Mitteilung bei NCGG5 Tagung am 1.Juli 2009, Wageningen
- Wulf, S. (2002): Untersuchung der Emissionen von NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> nach Ausbringung von Kofermentationsrückständen in der Landwirtschaft. Dissertation (Dr.rer.nat.) an der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth. Februar 2002
- Wuppertal Institut, Institut für Energetik und Umwelt Leipzig, Fraunhofer UMSICHT, Gas-Wärme-Institut Essen (2006): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Im Auftrag des BGW/ DVGW. Wuppertal, Leipzig, Oberhausen, Essen.
- Leibnitz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. (2009) FNR-Projekt: Entwicklung und Vergleich von optimalen Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands (EVA), Schlussbericht zu Teilprojekt II: Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenbaus